



**CLASIFICACIÓN MORFOLOGÍA E HIDRODINÁMICA DE LAS PLAYAS
DEL CARIBE COLOMBIANO.**

MARGARITA YELENE GUERRERO PEÑA

Universidad del Norte
Facultad de Ciencias
Departamento de Física
Barranquilla, Colombia
2017

**CLASIFICACIÓN MORFOLOGÍCA E HIDRODINÁMICA DE LAS PLAYAS
DEL CARIBE COLOMBIANO.**

MARGARITA YELENE GUERRERO PEÑA

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Física Aplicada

Director:

Oceanógrafo Físico, Ph.D Luis Jesús otero Díaz.

Línea de Investigación:

Océano y atmosfera

Universidad del Norte

Maestría de Física aplicada

Facultad de Ciencias Básicas

Departamento de física

2017

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecerle a Dios, Él siempre está en todos mis caminos bendiciéndome y regalándome un ratito más al lado de los míos.

Mi familia, Son el motor de mi vida, gracias por creer en mí, por apoyarme en todo, por siempre estar allí para mí, por consentirme y ser toda mi vida.

Mi tutor Luis Otero, gracias por todos sus conocimientos, su apoyo, su paciencia y entrega a mi trabajo.

Profesor Mario Conde, “Mi Codi”, gracias por toda su ayuda y asesoría en este proyecto...Gracias por aguantarse cada una de mis bromas.

Mis compañeros de Laboratorio, Marcos, José y Karen Gracias por toda su ayuda cada vez que la necesite, su compañía y palabras de aliento.

CONTENIDO

<u>CAPITULO 1</u>	13
1.1. INTRODUCCIÓN	13
1.2. MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES.	14
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.	25
1.4. OBJETIVOS	27
1.4.1. <u>OBJETIVO GENERAL</u>	27
1.4.2. <u>OBJETIVOS ESPECIFICOS</u>	27
<u>CAPITULO 2</u>	28
<u>CARACTERÍSTICAS DE LAS PLAYAS DEL CARIBE COLOMBIANO.</u>	28
2.1. <u>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</u>	29
2.2. <u>ANÁLISIS DEL CLIMA MARÍTIMO</u>	40
2.2.1. <u>PÁJARO - GUAJIRA</u>	40
2.2.2. <u>RIOHACHA - GUAJIRA</u>	42
2.2.3. <u>COSTA VERDE – CIÉNAGA</u>	44
2.2.4. <u>PUERTO VELERO- ATLÁNTICO.</u>	47
2.2.5. <u>MANZANILLO – BOLIVAR</u>	49
2.2.6. <u>BOCAGRANDE- CARTAGENA.</u>	51
2.2.7. <u>BERRUGA- SUCRE Y PUNTA DE SAN BERNARDO- BOLIVAR</u>	53
2.2.8. <u>TOLÚ- SUCRE</u>	56
2.2.9. <u>COVEÑAS-SUCRE</u>	58
2.2.10. <u>TINAJONES- SUCRE</u>	60
<u>CAPITULO 3</u>	63
<u>METODOLOGÍA</u>	63
<u>CAPITULO 4.</u>	67
<u>PROPAGACIÓN DEL OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS A LAS PLAYAS</u>	67
4.1. <u>DESCRIPCIÓN DEL MODELO SWAN</u>	67
4.2. <u>DESCRIPCIÓN DE LAS MALLAS DE CÁLCULO</u>	69
4.2. <u>RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN</u>	73
4.2.1. <u>PÁJARO</u>	73
4.2.2. <u>RIOHACHA</u>	74
4.2.3. <u>COSTA VERDE</u>	74
4.2.4. <u>PUERTO VELERO</u>	75
4.2.5. <u>MANZANILLO</u>	76
4.2.6. <u>BOCAGRANDE</u>	76
4.2.7. <u>PUNTA SAN BERNARDO</u>	77
4.2.8. <u>BERRUGAS</u>	77
4.2.9. <u>TOLÚ</u>	78
4.2.10. <u>COVEÑAS</u>	78
4.2.11. <u>TINAJONA</u>	79
<u>CAPITULO 5.</u>	81
<u>CONDICIONES DE EQUILIBRIO EN LAS PLAYAS DEL CARIBE COLOMBIANO</u>	81
5.1. <u>PERFIL AJUSTADO POR LA ECUACIÓN DE DEAN:</u>	81

<u>5.2. PERFIL DE EQUILIBRIO AJUSTADO POR LA ECUACIÓN DE INMAN:</u>	82
<u>5.3. PERFIL DE EQUILIBRIO AJUSTADO POR LA ECUACIÓN DE BERNABEU:</u>	83
<u>5.4. AJUSTE DE LOS PERFILES DE PLAYA POR MEDIO DE LAS EXPRESIONES DE DEAN, INMAN Y BERNABEU</u>	86
<u>5.4.1. AJUSTE DEL PERFIL DE DEAN:</u>	86
<u>5.4.2. AJUSTE DE PERFIL DE INMAN:</u>	92
<u>5.4.3. AJUSTE DEL PERFIL DE BERNABEU:</u>	97
<u>CAPITULO 6</u>	103
<u>CARACTERÍSTICAS DE LAS PLAYAS A PARTIR DEL AJUSTE DEL PERFIL BERNABEU Y EL NÚMERO DE IRIBARREN</u>	103
<u>6.1. PAJARO:</u>	106
<u>6.2. RIOHACHA</u>	108
<u>6.3. COSTA VERDE:</u>	109
<u>6.4. PUERTO VELERO</u>	111
<u>6.5. MANZANILLO</u>	112
<u>6.6. BOCAGRANDE:</u>	113
<u>6.7. PUNTA SAN BERNARDO</u>	115
<u>6.8. BERRUGAS</u>	116
<u>6.9. TOLÚ</u>	117
<u>6.10. COVEÑAS</u>	119
<u>6.11. TINAJONES</u>	120
<u>CAPITULO 7.</u>	122
<u>ANÁLISIS DE RESULTADOS</u>	122
<u>CAPITULO 8</u>	124
<u>CONCLUSIONES</u>	124
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	126

INDICE DE FIGURAS

<u>Figura 1: Esquema de perfil de equilibrio.</u>	14
<u>Figura 2: Ubicación de playas en el Caribe Colombiano objeto de estudio</u>	28
<u>Figura 3: Principales sistemas de corrientes en el Caribe Colombiano. Giro Panamá Colombia (GPC), Corriente del Caribe (CC), Contracorriente Panamá Colombia (CCPC).</u>	30
<u>Figura 4: Localización de la zona de estudio en la playa de Pájaro ubicada en Guajira, Imagen de playa Pájaro.</u>	31
<u>Figura 5: Localización de la zona de estudio en la playa de Riohacha ubicada en Guajira Imagen de playa Riohacha.</u>	32

<u>Figura 6: Localización de la zona de estudio en la playa de Costa Verde ubicada en Ciénaga. Imagen de playa Costa Verde.</u>	33
<u>Figura 7: Localización de la zona de estudio en la playa de Puerto Velero ubicada en Atlántico Imagen de playa Puerto Velero.</u>	34
<u>Figura 8: Localización de la zona de estudio en la playa de Manzanillo ubicada en Bolívar. Imagen de playa Manzanillo.</u>	35
<u>Figura 9: Localización de la zona de estudio en la playa de Bocagrande ubicada en Cartagena Imagen de playa Bocagrande.</u>	35
<u>Figura 10: Localización de la zona de estudio en la playa de Punta de San Bernardo ubicada en Sucre Imagen de playa Punta de San Bernardo.</u>	36
<u>Figura 11: Localización de la zona de estudio en la playa Berrugas ubicada en sucre. Imagen de playa Berrugas.</u>	36
<u>Figura 12: Localización de la zona de estudio en la playa de Tolú ubicada en Sucre Imagen de playa Tolú.</u>	37
<u>Figura 13: Localización de la zona de estudio en la playa de Coveñas ubicada en Sucre. Imagen de playa Coveñas.</u>	38
<u>Figura 14: Localización de la zona de estudio en la playa de Tinajones ubicada en Córdoba Imagen de playa Tinajones.</u>	39
<u>Figura 15: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Pájaro</u>	40
<u>Figura 16: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Pájaro</u>	40
<u>Figura 17: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Riohacha</u>	42
<u>Figura 18: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Riohacha</u>	42
<u>Figura 19: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico en Ciénaga.</u>	44
<u>Figura 20: Histograma y frecuencia acumulada para Hs en Ciénaga.</u>	44
<u>Figura 21: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Puerto Velero</u>	46
<u>Figura 22: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Puerto Velero</u>	47
<u>Figura 23: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Manzanillo.</u>	48
<u>Figura 24: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Manzanillo</u>	49
<u>Figura 25: Registro histórico y rosa para alturas significantes (Hs) y periodo de pico (Tp) en Bocagrande.</u>	51
<u>Figura 26: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Bocagrande</u>	51

<u>Figura 27: Registro histórico y rosa para alturas significantes (Hs) y periodo de pico (Tp) en Berruga y Punta de San Bernardo</u>	53
<u>Figura 28: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Berruga y Punta San Bernardo</u>	54
<u>Figura 29: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Tolú</u>	55
<u>Figura 30: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Tolú</u>	56
<u>Figura 31: Registro histórico y rosa para altura y periodo de pico Coveñas</u>	57
<u>Figura 32: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Coveñas</u>	58
<u>Figura 33: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Tinajones</u>	60
<u>Figura 34: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Tinajones</u>	60
<u>Figura 35: Batimetría de la zona Guajira, playas Pájaro y Riohacha</u>	69
<u>Figura 36: Batimetría de la playa Costa Verde</u>	70
<u>Figura 37: Batimetría de la playa Puerto Velero</u>	70
<u>Figura 38: Batimetría de la playa Manzanillo</u>	71
<u>Figura 39: Batimetría de la playa Bocagrande</u>	71
<u>Figura 40: Batimetría de la zona Golfo de Morrosquillo, playas Punta San Bernardo, Berrugas, Tolú, Coveñas, Tinajones.</u>	72
<u>Figura 41: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa pájaro</u>	73
<u>Figura 42: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Riohacha</u>	73
<u>Figura 43: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Costa Verde</u>	74
<u>Figura 44: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Puerto Velero</u>	74
<u>Figura 45: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Manzanillo</u>	75
<u>Figura 46: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Bocagrande</u>	75
<u>Figura 47: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Punta San Bernardo</u>	76
<u>Figura 48: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Berrugas</u>	77

<u>Figura 49: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Tolú</u>	77
<u>Figura 50: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Coveñas</u>	78
<u>Figura 51: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Tinajones</u>	78
<u>Figura 52: Modelo de perfil de equilibrio propuesto por Inman et al. (1993).</u>	81
<u>Figura 53: Perfil de equilibrio en dos tramos propuesto por Bernabeu en 1999</u>	82
<u>Figura 54: Coeficientes de la forma del perfil de playa hallados por Bernabéu 2001</u>	85
<u>Figura 55: Ajuste Perfil Dean a la playa de Pájaro.</u>	86
<u>Figura 56: Ajuste perfil Dean a la playa de Riohacha</u>	86
<u>Figura 57: Ajuste perfil Dean a la playa de Costa verde</u>	87
<u>Figura 58: Ajuste perfil Dean a la playa de Puerto Velero</u>	87
<u>Figura 59: Ajuste perfil Dean a la playa de Manzanillo</u>	87
<u>Figura 60: Ajuste Perfil Dean a la playa de Bocagrande.</u>	88
<u>Figura 61: Ajuste Perfil Dean a la playa de Punta San Bernardo</u>	88
<u>Figura 62: Ajuste perfil Dean a la playa de Berrugas</u>	88
<u>Figura 63: Ajuste de Perfil Dean a la playa de Tolú</u>	89
<u>Figura 64: Ajuste de Perfil Dean a la playa de Coveñas</u>	89
<u>Figura 65: Ajuste de Perfil Dean a la playa de Tinajones</u>	89
<u>Figura 66: Perfil Inman playa de Pájaro</u>	92
<u>Figura 67: Ajuste Perfil Inman playa de Riohacha</u>	92
<u>Figura 68: Ajuste Perfil Inman playa de Costa Verde</u>	92
<u>Figura 69: Ajuste Perfil Inman playa de Puerto Velero</u>	93
<u>Figura 70: Ajuste Perfil Inman playa de Manzanillo</u>	93
<u>Figura 71: Ajuste Perfil Inman playa de Bocagrande</u>	93
<u>Figura 72: Ajuste Perfil Inman playa de Punta de San Bernardo</u>	94
<u>Figura 73: Ajuste Perfil Inman playa de Berrugas</u>	94
<u>Figura 74: Ajuste Perfil Inman playa de Tolú</u>	94
<u>Figura 75: Ajuste Perfil Inman playa de Coveñas</u>	95
<u>Figura 76: Ajuste Perfil Inman playa de Tinajones</u>	95

<u>Figura 77: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Pájaro</u>	97
<u>Figura 78: Ajuste perfil Bernabéu playa de Riohacha</u>	97
<u>Figura 79: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Costa Verde</u>	98
<u>Figura 80: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Puerto Velero</u>	98
<u>Figura 81: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Manzanillo</u>	98
<u>Figura 82: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Bocagrande</u>	99
<u>Figura 83: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Punta de San Bernardo</u>	99
<u>Figura 84: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Berrugas</u>	99
<u>Figura 85: Ajuste perfil Bernabéu playa de Tolú</u>	100
<u>Figura 86: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Coveñas</u>	100
<u>Figura 87: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Tinajones</u>	100
<u>Figura 88: Coeficientes de la forma de perfil playa de Pájaro</u>	106
<u>Figura 89: Porcentaje I_r y I_{rb} para playa de pájaro</u>	106
<u>Figura 90: Coeficiente de la forma de perfil Riohacha</u>	107
<u>Figura 91: Porcentaje I_r y I_{rb} para playa Riohacha.</u>	108
<u>Figura 92: Coeficientes de forma de perfil Costa Verde</u>	109
<u>Figura 93: Porcentaje I_r para playa Costa Verde</u>	109
<u>Figura 94: Coeficiente de forma de perfil Puerto Velero</u>	110
<u>Figura 95: Porcentaje de I_r y I_{rb} para playa Puerto Velero</u>	110
<u>Figura 96: Coeficientes de la forma del perfil de playa Manzanillo.</u>	111
<u>Figura 97: Porcentaje de I_r y I_{rb} para playa Manzanillo</u>	112
<u>Figura 98: Coeficiente de Forma de Perfil playa Bocagrande</u>	113
<u>Figura 99: Porcentaje I_r y I_{rb} para playa Bocagrande</u>	113
<u>Figura 100: Coeficiente de forma de perfil Punta de San Bernardo</u>	114
<u>Figura 101: Porcentaje I_{rb} para playa Punta de San Bernardo</u>	114
<u>Figura 102: Coeficiente de Forma de Perfil playa Berrugas</u>	115
<u>Figura 103: Porcentaje de I_r y I_{rb} para playa Berrugas</u>	116
<u>Figura 104: Coeficientes de forma de perfil Tolú</u>	117
<u>Figura 105: Porcentaje de I_r y I_{rb} para playa Tolú</u>	117

Figura 106: Coeficientes de la forma del perfil Coveñas	118
Figura 107: Porcentaje de Ir y Irb para playa Coveñas	118
Figura 108: Coeficiente forma del perfil Tinajona.	119
Figura 109: Porcentaje Ir y Irb para playa Tinajones	120

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Modelos morfodinámicos del perfil de equilibrio	15
Tabla 2: Valores límite para playas micromareales del parámetro Ω y m según Wright y Short (1984)	16
Tabla 3: Modelos de la disipación de la energía	21
Tabla 4: Estadísticos Básicos HS Pájaro	41
Tabla 5: Estadísticos Básicos HS Riohacha	43
Tabla 6: Estadísticos Básicos HS Costa Verde	45
Tabla 7: Estadísticos Básicos HS Puerto Velero	47
Tabla 8: Estadísticos Básicos HS Manzanillo	49
Tabla 9: Estadísticos Básicos de HS Bocagrande	52
Tabla 10: Estadísticos Básicos de HS Berruga y Punta de San Bernardo	54
Tabla 11: Estadísticos básicos Hs Tolú	56
Tabla 12: Estadísticos Básicos para Hs Coveñas	58
Tabla 13: Estadísticos básicos Hs Tinajones.	61
Tabla 14: Características de las mallas batimétricas	68
Tabla 15: Valores de A para el Perfil de Dean playas del Caribe Colombiano	90
Tabla 16: Valores de A y m para cada tramo del Perfil de Inman para las playas del Caribe Colombiano.	96
Tabla 17: Valores de los Coeficientes A, B, C y D para las playas del Caribe Colombiano.	101
Tabla 18: Relación entre el modelo de perfil de Bernabéu y el modelo de Wright y Short	103

CAPITULO 1

1.1. INTRODUCCIÓN

Las playas son altamente dinámicas, en ellas sucede la interacción de vientos, oleaje y mareas, los cuales modifican la morfología de éstas y hacen que el material sedimentario esté en constante movimiento. La playa se enmarca dentro de la zona costera, que se extiende desde la línea de costa hasta la plataforma continental y desde la orilla hasta el primer gran cambio de la topografía sobre el alcance de las olas, (Avendaño C, 2012).

El estudio de las playas se realiza conociendo sus características morfológicas y estimación de parámetros relacionados con la altura y amplitud del oleaje, pendiente o perfil. La cuantificación de estas características, así como los cambios en los parámetros que las determinan, permiten inferir sobre los procesos involucrados en la dinámica de la playa, (Zetina MCE, 2008). Un instrumento para evaluar el estado y los cambios en las playas, es el perfil de playa, el cual varía constantemente como respuesta a los cambios del transporte transversal de sedimentos que produce la dinámica marina, especialmente el oleaje.

El perfil de playa puede presentar una morfología variada a lo largo de la costa. Sin embargo, todos los perfiles mantienen una mayor pendiente en la zona cercana de la línea de costa y una disminución progresiva de dicha pendiente hacia mar adentro, (Bernabéu *et al*, 2001). Esta regularidad ha permitido el desarrollo de modelos teóricos que tratan de integrar todas las dinámicas del oleaje, con el objetivo de poder predecir la evolución de las playas, (Vidal et al 1995).

Los modelos de evolución morfodinámica de playa se definen relacionando sus características morfológicas e hidrodinámicas y las condiciones de

sedimento y oleaje. Basándose en la observación y la ordenación de los diferentes estados de la playa, permiten predecir la distribución de estados de una playa, conocida la distribución de las acciones del oleaje y el tipo de sedimento. Así mismo, facilitan una herramienta para evaluar, de una manera aproximada la dirección e intensidad del cambio de estado de una playa, cuando cambian las condiciones del oleaje, (Vidal *et al* ,1995).

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se estableció la relación existente entre la forma de cada tramo del perfil de algunas playas representativas del Caribe Colombiano, con los procesos hidrodinámicos allí presentes. De acuerdo a lo propuesto por Bernabéu (2003), Inman (1993) y Dean (1991), se planteó un modelo teórico- conceptual que relaciona estos procesos con la morfología del perfil de playa, tomando como referencia las características de los sedimentos y los parámetros hidrodinámicos asociados al oleaje de las playas del caribe colombiano.

1.2. MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES.

El perfil de playa se define como la variación de la profundidad h , a medida que se acerca a la línea de costa, en la dirección normal a ésta (Figura 1). Estos perfiles presentan una forma cóncava y esta regularidad ha permitido el desarrollo de diversas expresiones numéricas y la introducción del concepto de perfil de equilibrio.

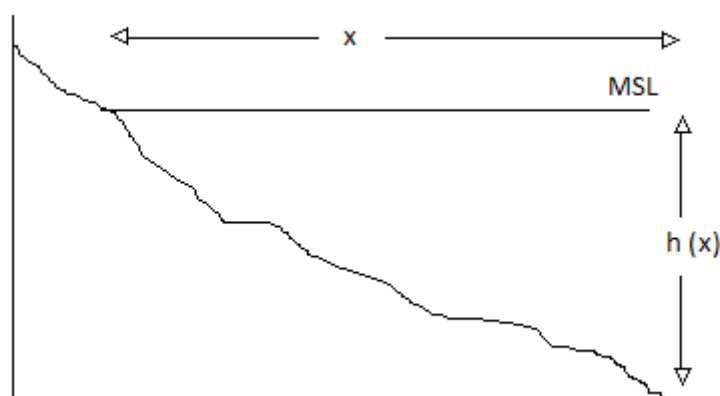


Figura 1: Esquema de perfil de equilibrio.

La primera aproximación al concepto de perfil de equilibrio fue desarrollada por Fenneman (1902) en la cual menciona que “existe un perfil de equilibrio, al cual

el agua dará lugar en último término, si se le permite completar su trabajo”. Más adelante Larson (1991) lo define como: “Una playa con un tamaño de grano determinado, expuesta a unas condiciones constantes de oleaje, desarrollará una forma del perfil que no presentará ningún cambio neto con el tiempo”. Por consiguiente, un perfil alcanza el equilibrio cuando hay un balance entre las fuerzas en cada punto del perfil, tal que el transporte sea cero. Estas condiciones dan como resultado que el concepto del perfil de equilibrio sea totalmente teórico, nos obstante González (1995) indica que la variabilidad del perfil está limitada, por lo que se puede definir un estado modal o más frecuente, que nos permitirá describir las características generales del perfil.

Se han propuesto varias expresiones para definir el perfil de equilibrio, una de las formulaciones más aplicadas en el campo de la ingeniería de costas es la propuesta por Brunn (1954), que encontró un modelo de perfil, a partir del análisis de perfiles de playa de la costa norte danesa y de Mission Bay (California), pero ésta solo estaba limitada a la zona del perfil aguas-adentro del punto de rotura. Dean (1977) extendió la aplicación de esta expresión hasta la zona de rompientes, ajustándola a 504 perfiles de la costa atlántica y de la costa de EEUU sobre el golfo de México medido por Hayden et al. (1975). Utilizando el método de mínimos cuadrados obtuvo una expresión similar a la de Brunn y concluyó que la disipación de energía por unidad de volumen en la zona de rotura es constante. Inman *et al* (1993) fueron los primeros que propusieron un modelo de perfil de equilibrio considerando las diferencias reales en las fuerzas que actúan sobre el perfil, distinguiendo entre la zona de aguas profundas hasta el punto de rotura, donde la acción principal es ejercida por el asomeramiento de las ondas, y la zona desde el punto de rotura hasta la línea de costa, donde el proceso que actúa es la rotura del oleaje y la propagación de los bores.

En la tabla 1 se pueden observar las formulaciones más empleadas de algunos de los modelos morfodinámicos de perfil de equilibrio.

Tabla 1: Modelos morfodinámicos del perfil de equilibrio

Formulaciones	Ecuación	Variables
		h = Profundidad

Brunn (1954)	$h(x) = Ax^{2/3}$	x = Distancia a la línea de costa A = Parámetro de escala
Dean (1991)	$h(x) = Ax^n$	n = parámetro de forma variable A = Parámetro de Dean
Bodge (1992)	$h = B(1 - e^{-kx})$	B y k = Coeficientes empíricos
Inman (1993)	$h - h_o = A(x - x_o)^m$	h _o = Profundidad de la barra x _o = Distancia desde la línea del nivel del mar a la barra m = Pendiente de la playa A = Parámetro de Inman
Bernabéu (2003)	<p>Rotura</p> $x = \left(\frac{h}{A}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{B}{A^{\frac{3}{2}}} h^3$ <p>Asomeramiento</p> $X = X - X_o = \left(\frac{h}{C}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{D}{C^{\frac{3}{2}}} h^3$	A = Coeficiente de disipación en rotura B Coeficiente de reflexión en rotura C = Coeficiente de disipación en asomeramiento D = Coeficiente de reflexión en asomeramiento x _o = Distancia desde la línea del nivel del mar hasta el punto de rompiente

Un conocimiento de las características morfológicas del perfil y la incidencia del oleaje sobre él, es fundamental en el ámbito de seguimiento, gestión y regeneración de las playas, por lo que se han realizado numerosos modelos morfodinámicos de playa, donde se integra la morfología y la dinámica de la playa. Uno de lo más utilizado es el desarrollado por Wright y Short (1984), el cual describe la variabilidad morfodinámica de la playa teniendo en cuenta el

oleaje y las características de los sedimentos, definiendo seis estados morfodinámicos: disipativos, reflejantes y cuatro estados intermedios. Estos estados morfodinámicos dependen del parámetro adimensional de caída de grano Ω , el cual se define por:

$$\Omega = H/wT$$

En donde H es la altura de la ola en rotura, T es el periodo de pico y w es la velocidad de caída del sedimento característico de la playa. Los valores de Ω para cada uno de los estados de playa se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2: Valores límite para playas micromareales del parámetro Ω y m según Wright y Short (1984)

Estado	Valores de Ω	Pendiente (m)
Disipativo	$\Omega > 5,5$	$\tan \beta = 0.01$
Barra longitudinal y seno	$\Omega = 4,7$	$0,05 < \tan \beta < 0,1$
Barra y playa rítmica	$\Omega = 3,5$	$0,05 < \tan \beta < 0,1$
Barra transversal y corriente de retorno	$\Omega = 3,1$	$\tan \beta = 0,05$
Barra canaleta o terraza de bajamar	$\Omega = 2,4$	$0,1 < \tan \beta < 0,2$
Refletivo	$\Omega < 1,5$	$0,1 < \tan \beta < 0,2$

Posteriormente Masselink y Short (1993), plantearon un modelo de la evolución de la morfología de la playa, en el cual clasificaban las playas teniendo en cuenta el parámetro Ω y los rangos de marea, en donde mostraban que estos cambios de marea producen modificaciones en los procesos de transporte de sedimentos y cambio de estado de playa.

Medina *et al* (1995), realizaron un trabajo sobre la variabilidad de los perfiles de playa teniendo en cuenta su forma y su distribución granulométrica, en donde observaron que los perfiles cambian de manera espacial y temporal

según la morfodinámica de la playa y el tamaño del sedimento en cada parte del perfil.

Bernabéu *et al* (2001), desarrollaron un modelo que relaciona la morfología del perfil y las características hidrodinámicas y sedimentológicas de la playa, en el cual se obtuvo unas formulaciones analíticas para cada tramo del perfil (rotura y asomeramiento), las cuales pueden predecir la morfología que adoptará el perfil en función del parámetro Ω y las condiciones hidrodinámicas que lo afecten. En el 2003 Bernabéu *et al*, reafirma su modelo teniendo en cuenta la reflexión de la ola, describiendo así de manera más precisa la morfología del perfil ya que integra a esta formulación el modelo morfodinámico de playas de Wright y Short (1984), siendo válido para describir la morfología del perfil para los diferentes estados morfodinámicos establecidos en el modelo: disipativo, intermedio y reflectivo.

Bernabéu *et al* (2003), consideraron la importancia de la marea, incluyéndola en su modelo de perfil de equilibrio en dos tramos, observando que la marea genera una variación continua en la profundidad en cada punto del perfil. El principal efecto de estos cambios en el perfil es el estiramiento del perfil de rotura, sobre todo cuando el rango de marea es alto.

Scott *et al* (2011), realizaron estudios de las características y la clasificación de las playas de Inglaterra y Gales, proponiendo un modelo que además de tener en cuenta el parámetro Ω y el rango de marea, incluía el nivel de energía de las olas para una clasificación modal, identificando 9 grupos de playas (Reflectivas de baja energía (RLE), Reflectiva de alta energía (RHE), Lineal con barra sub- mareal (STB), Terraza en bajamar/ Sin barra disipativa de baja energía (LTT- DLE), Terraza de baja mar y rip (LTT+R), Marea baja rip en barra (LTBR), Disipativa sin barra de alta energía (NBD HE), Intermareales con múltiples barras (MITB), Transiciones a planicies intermareales (TTF)). Esta clasificación proporciona una clara caracterización de los diferentes tipos de playa y la cuantificación de las características ola/marea/sedimento que ayuda a ver claras diferencias morfodinámicas.

Aagaard *et al* (2013), realizaron una revisión de los estados modales de las playas, examinando las tasas de transportes y las direcciones dentro de los

estados de las playas, los cuales son importantes para el entendimiento de las interacciones entre la hidrodinámica y la morfología. En este estudio pudieron observar que la velocidad del transporte de sedimento es más alta en los estados intermedios y más baja en los estados disipativos y reflejantes esto hace que para los estados disipativos y reflejantes la morfología se mantenga relativamente constante.

Actualmente se han desarrollado muchos estudios de la morfodinámica de las playas utilizando modelos computacionales, que proporciona un análisis más claro de la hidrodinámica de la playa y genera mejores predicciones de los estados modales de la misma.

Guisado *et al* (2015), realizaron un estudio del estado morfodinámico de las playas del litoral de Doñana en el mar Cantabro Español, a través de la modelación numérica de la propagación y asomamiento del oleaje, a través de un análisis estadístico de las series temporales del clima marítimo y la propagación del oleaje a través del modelo SWAN. Se utiliza también el parámetro escalar de Surf (Goza e Imman 1975), desarrollando una metodología multiescala de cálculo de indicadores morfodinámicos para la caracterización del estado de playa e indicadores de estado y tendencia por medio del modelo morfodinámico costero de estado y tendencia (MMCET), logrando caracterizar los tipos morfodinámicos de playas y los cambios que sufre en el tiempo.

N. K Barman *et al* (2016), realizan un estudio de la morfodinámica de las playas utilizando el modelo MOPLA del SMC, que incorpora la propagación de las ondas, la ecuación de Navier Stoke y el modelo de sedimentos, teniendo como resultado una mejor estimación del volumen de movilización del sedimento y su acumulación respectiva, realizando un mejor análisis de la morfología de las playas.

Los cambios en la morfología de la playa vienen relacionados directamente con el modo en que la energía del oleaje incidente se reparte a lo largo del perfil, siendo la turbulencia y la fricción con el fondo los mecanismos principales de estos cambios. Antes de la rompiente, la disipación debida a la fricción en el

fondo es el proceso principal de atenuación energética. Cuando la ola rompe, el mecanismo dominante es la disipación turbulenta de la energía de la onda.

Se han desarrollado muchos estudios de la dinámica del oleaje en la zona de rompientes, uno de los primeros en estudiarla fue Battjes y Janssen en 1978, que propusieron un modelo para predecir cuantitativamente la variación de la densidad media de la energía E debida a la variación de las alturas de oleaje irregular en la zona cercana a la costa mediante una aproximación basada en el balance de energía, considerando un dominio bidimensional, con las olas incidiendo normalmente sobre la costa.

Thornton y Guza (1983), estudiaron la transformación de la altura del oleaje irregular durante el asomeramiento, incluyendo olas rompiendo en la zona de surf. Estos describen la transformación de la distribución de la altura de ola desde una cierta profundidad hasta la zona de rompientes, mediante un modelo conceptual que utiliza la función de densidad probabilística de altura de ola, H_{rms} y la fricción en el fondo en función de la disipación.

Battjes y Stive (1984), llevaron a cabo una calibración y verificación de la forma de modelar la rotura y la disipación del oleaje sobre un rango de perfiles de playa más amplio que el estudiado por Battjes y Janssen (1978) y Thornton y Guza (1983). El modelo integra numéricamente el balance de la energía y momentum con respecto a la distancia transversal a la costa, usando los valores de frecuencia de pico, α que es una constante de orden 1 y γ parámetro de rotura dando como resultado los valores de H_{rms} en dirección a la costa.

Larson (1995), propuso un modelo, el cual asume que, fuera de la zona de rompientes, las alturas de las olas se distribuyen según la función de distribución continua, Rayleigh. En él se puede ver que dentro de la zona de rompientes se separa el oleaje en tres tipos: Olas rotas, Olas sin romper y olas reformadas que se asocian para predecir la altura de la ola cuadrática media.

Rattanapitikon y Shibayama (1998), realizaron un modelo que no asume disipación de la energía por rotura similar a la del "bore", ellos asumen un modelo en donde la disipación de la energía es proporcional a la diferencia

entre el flujo de energía local de una ola rompiendo y el flujo de energía estable.

M. Stutz et al (1998), diferenciaron los mecanismos de disipación de energía en cada zona del perfil, en donde reafirman que en la zona de asomeramiento la energía de las olas es disipada por la fricción en el fondo, pequeños vórtices originados en el fondo y las fluctuaciones horizontales. En la zona de rompientes la disipación de la energía principalmente es por turbulencia y en la zona de swash la energía de la ola es disipada por la continua turbulencia, por la fricción con la playa y las pequeñas vorticidades allí generadas. Esta disipación de energía de las olas es fuertemente no uniforme debido a que los procesos de turbulencia y de fricción no están activos en todo el perfil. La fricción del fondo es fuertemente no lineal y aumenta bruscamente en aguas poco profundas y la energía infragravitatoria no se considera en la zona de rompientes.

Bernabéu et al (2002), realizaron su modelo de perfil de equilibrio en dos tramos (asomeramiento y rotura) en donde, la energía del oleaje incidente al alcanzar una playa sufre diferentes procesos de disipación de energía en cada uno de estos tramos. Para el perfil de asomeramiento la disipación de energía es debida a la fricción con el fondo la cual se asume constante, y dentro de la zona de rompientes el fenómeno principal de disipación de energía es la turbulencia asociada a la rotura.

Algunas formulaciones de los modelos de disipación de energía se pueden ver en la tabla No 3:

Tabla 3: Modelos de la disipación de la energía

Formulaciones	Ecuaciones	Variables
Battjes y Janssen (1978)	$Db = K1 Qb \frac{\rho g H b^2}{4Tp}$	Tp Periodo de pico K1 Coeficiente de la ola rota Qb Fracción de olas rotas

		Hb Altura de la ola
Thorton y Guza (1983)	$Db = K4 \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \left(\frac{Hrms}{Hb} \right)^2 \left\{ 1 - \frac{1}{[1 + (Hrms/Hb)^2]^{2.5}} \right\} \frac{\rho g Hrms^3}{4Tph}$	K4 Coeficiente de la ola rota Hrms Altura de la ola cuadrática media H profundidad Hb Altura de la ola
Battjes y Stive (1984)	$Db = K6 Qb \frac{\rho g Hb^2}{4Tp}$	K6 Coeficiente de la ola rota
Larson (1995)	$Db = \frac{\kappa}{d} (Frms - Fstab)$	K Parámetro empírico = 0.15 d Profundidad del agua Frms Flujo de energía del oleaje Fstab Flujo de energía estable
Bernabéu (2003)	<p>Perfil de rotura:</p> $\frac{1}{h} \left[\frac{dF1}{dx} - \frac{dFr}{dx} \right] = \frac{\varepsilon r}{h} = D^* = cte$ <p>Perfil de asomeramiento</p> $\left[\frac{dF1}{dx} - \frac{dFr}{dx} \right] = \varepsilon r = D^* = cte$	F1 Flujo de energía incidente Fr Flujo de energía reflejada \varepsilon r Disipación de energía en la rotura \varepsilon f Disipación de energía en el asomeramiento h profundidad

Y. H Zheng *et al* (2003), hallaron una ecuación para el balance de la energía de una ola, que incluía el cambio de la energía en el tiempo y los efectos de la

disipación de la energía por la fricción en el fondo y la turbulencia, tomando como base la ecuación de pendiente suave dependiente del tiempo y la ecuación de balance energético de la onda para altura de olas regulares e irregulares.

W Rattanapitikon (2007), calibró ocho modelos de disipación de energía existentes (Battjes and Janssen 1978, Thorton and Guza 1983, Battjes and Stive 1984, Southgate and Nair 1993, Baldock et al 1998, Rattanapitikon and shibayama 1998, Riessink et al 2003, Rattanapitikon et al 2003),llegando a la conclusión que el modelo de Battjes and Stive es el modelo que realiza las mejores predicciones de calcular Hrms en una amplia gama de condiciones ambientales ya que se obtiene la altura de ola media cuadrática en cada punto dentro de la zona de rompiente y la variación del nivel medio debido a la presencia del oleaje en rotura.

Stelling y Zijlema (2009), desarrollaron un modelo numérico de la superficie de flujo libre que describe la propagación de la ola, desde la zona de asomeramiento hasta la zona de Swash, empleando diferencias finitas al modelo, divide el agua en unas cuadrículas clásicas escalonadas, las cuales se integran para aproximar la dinámica de las olas con un número muy limitado de puntos de celdas verticales arrojando profundidades positivas y una representación exacta del litoral lo que permite modelar las características dinámicas principales de la zona de surf como es la rotura.

Stagonas D *et al* (2012), describieron los efectos de la tensión superficial en la disipación de energía, con un modelo físico a pequeña escala de la rotura de la ola, encontrando que la tensión superficial tiene un efecto más significativo en la intensidad de la disipación de la energía de la ola de longitudes menores a 4m y con alturas de 0,11m.

Hannah E. *et al* (2013), proponen un modelo para describir la disipación de la energía en la zona de surf por medio de un parámetro de pendiente relativa de playa β para aguas poco profundas, este se define como la relación entre la pendiente de la playa local y la pendiente de la ola local (H/L), este parámetro

distingue entre condiciones de surf saturada e insaturada y podemos obtener dos formas para el perfil de playa cóncava hacia arriba para las condiciones de alta disipación y convexo hacia arriba por condiciones de baja disipación

Conde (2014), realizó modelación numérica de las playas de Galerazamba y Manzanillo del Mar, a partir del análisis de Fourier de la superficie libre del oleaje, encontrando que a medida que se acerca el oleaje a la costa, la energía de las frecuencias en la banda gravitatoria disminuye debido a la fricción con el fondo y rotura del oleaje, mientras que la energía de las frecuencias de la banda infragravitatoria aumenta en playas disipativas, sin embargo a partir de Fourier no es posible determinar de forma clara cuales de esas componentes dentro de la banda infragravitatoria gana energía a medida que la onda se aproxima a la costa, debido a que la energía de las frecuencias infragravitatorias no sigue un patrón de comportamiento común.

Merchan (2015), realizó un estudio de la hidrodinámica en la zona de rompientes de playas micromareales, teniendo en cuenta la contribución del régimen gravitatorio e infragravitatorio y su influencia en la morfología de la playa por medio de un análisis espectral, observando que la mayoría de estados de mar consecutivos tienen un comportamiento no estacionario, identificando los modos principales de las energías gravitatorias e infragravitatorias y su distribución a medida que se propaga el tren de onda y estableciendo los cambios de los perfiles de playa según la época climática.

Tovio (2016), desarrolló una propuesta metodológica para realizar una caracterización morfodinámica de playas a escala estacional, ajustando los perfiles por Langrange y realizando un análisis clúster, para discretizar el perfil e identificar las zonas de los sectores morfológicos de la playa con un criterio cuantitativo y definiendo las variables asociadas a la geometría de la playa.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.

El perfil de playa es una herramienta útil en el estudio de la morfodinámica de playas, presentando dos aplicaciones principales, una como herramienta de

cuantificación y otra como modelo de predicción. Así, en el estudio y seguimiento temporal de una playa, permite cuantificar los cambios morfológicos de primer orden que sufre la misma durante el período de monitoreo, fundamentalmente variaciones en la pendiente y en el grado de concavidad del perfil. De este modo, podemos establecer la relación de causalidad entre las condiciones hidrodinámicas (variaciones de altura de ola y período) y sedimentológicas (granulometría y textura) que determinan dicha morfología (Bernabéu et al, 2001).

El perfil de playa es fundamental para interpretar los procesos costeros y especialmente en el ámbito de seguimiento, gestión y regeneración de playas. Así, es particularmente útil en el análisis del impacto que las obras ingenieriles (construcción o ampliación de puertos, diques de protección, escolleras, etc.) tienen sobre los procesos de erosión costera o en la determinación, de forma más precisa, del volumen de arena necesario y el coste final de una obra de protección blanda como es la regeneración de una playa. Así, el perfil de equilibrio permite analizar los efectos que los cambios en el tamaño de grano de una playa, las variaciones del nivel del mar o las actuaciones antrópicas tienen sobre la morfología de la playa y, en general, sobre el litoral, (Bernabéu et al, 2001).

Las investigaciones sobre la morfología e hidrodinámica del perfil de playa que se han citado anteriormente, han sido innovadoras aportando un gran número de conocimientos sobre estos temas, sin embargo en las playas del caribe colombiano, todavía se puede generar un gran aporte sobre su morfología y dinámica, para tener un mejor entendimiento de los procesos costeros que ocurren. Por tal motivo, es fundamental el desarrollo de este proyecto, para contribuir al conocimiento de la morfología del perfil de playa, y dar respuestas a los siguientes interrogantes:

- ¿Cuál es el modelo de perfil de equilibrio que mejor se ajusta y representa a las playas del Caribe Colombiano?

- ¿Cuáles son las características morfológicas e hidrodinámicas presentes en las playas del Caribe Colombiano según este perfil de equilibrio?
- ¿Cuál es la relación entre las características morfológicas e hidrodinámicas presente en las playas del Caribe Colombiano y los estados morfodinámicos propuestos por Wright y Short (1984)?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer la clasificación morfológica e hidrodinámica de las playas del Caribe Colombiano a partir del modelo de perfil de equilibrio que mejor represente y se ajuste a las características hidrodinámicas y sedimentológicas de las playas seleccionadas para el estudio.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer la formulación de perfil de equilibrio que mejor represente las playas del Caribe Colombiano, de acuerdo con las condiciones sedimentológicas e hidrodinámicas existentes en la zona.
- Determinar las características morfológicas de las playas del Caribe Colombiano de acuerdo con el modelo del perfil de equilibrio que mejor se ajusta a la zona de estudio.
- Definir la relación existente entre los estados de playa propuestos por Wright y Short (1984) y las características morfológicas determinadas en la zona de estudio.
- Realizar una clasificación de los estados de playa de estudio por medio del Parámetro Adimensional de Caída del Sedimento y establecer las

principales características hidrodinámicas de las playas del Caribe Colombiano a través del número de Iribarren.

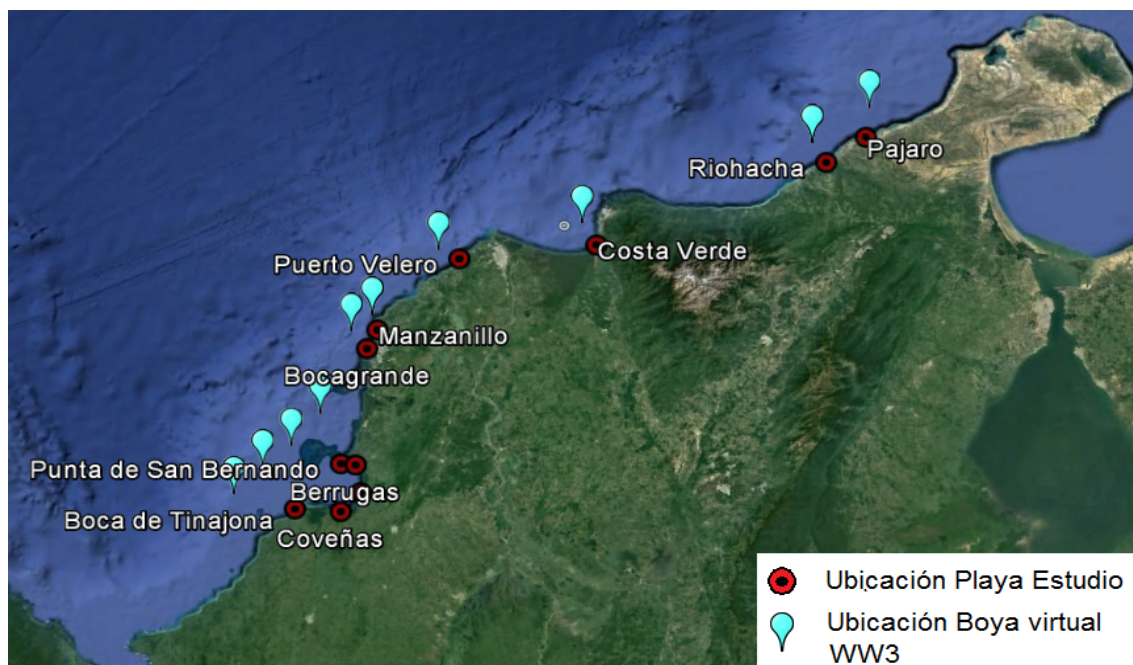
CAPITULO 2

CARACTERÍSTICAS DE LAS PLAYAS DEL CARIBE COLOMBIANO.

En el presente capítulo se presentan las principales características geomorfológicas y de clima marítimo del litoral caribe colombiano. El análisis del oleaje se efectuará a partir de la base de datos del programa de la NOAA WAVE WATCH 3. Esta base de datos fue procesada, adaptada y calibrada para aguas del mar Caribe Colombiano, en el marco del proyecto llamado “Programa de Investigación, desarrollo e Innovación de la protección de las zonas costeras en los departamentos de la Guajira y Magdalena”.

2.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende las playas en el Caribe Colombiano mostradas en la Figura 2. Por su situación geográfica, estas playas tienen un régimen climático influenciado por los desplazamientos Norte - Sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), asociada con la dinámica trans-ecuatorial de advección de humedad por los vientos alisios del este, la actividad del Chorro del Choco y de los sistemas convectivos de mesoescala, Poveda et al. (2004),



Fuente: Google earth, modificada por el autor

Figura 2: Ubicación de playas en el Caribe Colombiano objeto de estudio

El clima de la costa del Caribe colombiano se caracteriza por tener tres épocas climáticas diferentes en el año. La primera, época seca (verano), comprende los meses de diciembre hasta abril. Durante ésta época los vientos alisios soplan con intensidad procedentes del N y del NE y también pueden

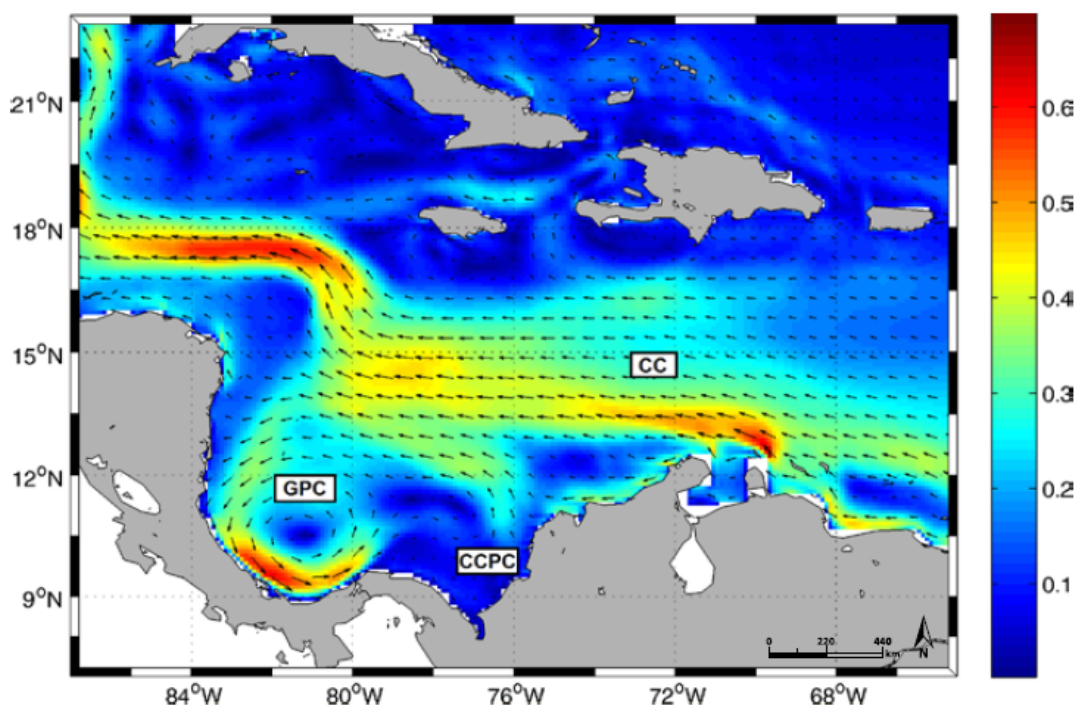
presentarse los mares de leva producidos por los frentes fríos. La segunda época es la de transición (Veranillo de San Juan) que se presenta en los meses de junio y julio. Al igual que la época seca, se presentan los vientos alisios precedentes del sector N y NE. La época húmeda o época de lluvias, se presenta desde agosto hasta noviembre y se caracteriza por un régimen de vientos variables (Martínez, J. O., 1993). Los vientos provenientes del N y NE se debilitan y aumentan los de dirección S y W entre septiembre y noviembre (Martínez, E., 1989).

La circulación oceánica en la cuenca colombiana presenta masas de aguas que son influenciadas por los vientos Alisios del este y que ingresan al Caribe por las Antillas menores para llegar a Centroamérica. Las corrientes superficiales están dominadas por la corriente del Caribe (CC) que fluye al noroeste hacia el mar Caimán (Andrade, 2001). No obstante, el Caribe suroeste es una cuenca semicerrada y la circulación superficial allí es más compleja, con la presencia un giro ciclónico, geográficamente restringido al golfo de Mosquitos en Panamá conocido como el Giro Panamá-Colombia (GPC) (Andrade, 2001), Como lo podemos observar en la figura 3, que posee una velocidad media superior a 60 cm.s^{-1} y más de 200 km de ancho (Bernal *et al.*, 2010).

Estudios realizados por Centurioni y Niiler (2003), plantean que la parte oeste del GPC es persistente a lo largo del año, mientras que hacia el este del mismo, se incrementa la variabilidad, lo que ocasiona que la extensión espacial y la intensidad en ese lado varíe con la estacionalidad. Es en esta parte del GPC, hacia la parte oceánica del golfo del Darién, que se desprende la Contra Corriente Panamá-Colombia (CCPC) (Andrade, 2001; Ruiz- Ochoa, 2011).

La CCPC disminuye en intensidad hacia el este (Bernal *et al.*, 2006), debido a que la mayor parte del transporte de la corriente recircula en el giro y se hace más pronunciada en la época húmeda, donde hay una menor influencia de los vientos Alisios del noreste por el desplazamiento de la ZCIT, esto le permite extenderse hasta la península de La Guajira (Donoso, 1990). Sin embargo, durante la estación seca, el efecto de los vientos limita su influencia a la costa

de Panamá y la parte sur de la costa colombiana hasta Cartagena; por tanto, la contracorriente experimenta variaciones estacionales en su intensidad y el área de influencia (Donoso, 1990).



Fuente: Bastidas et al, (2015)

Figura 3: Principales sistemas de corrientes en el Caribe Colombiano. Giro Panamá Colombia (GPC), Corriente del Caribe (CC), Contracorriente Panamá Colombia (CCPC).

Las playas seleccionadas para el presente trabajo son: Berrugas, Bocagrande, Costa Verde, Coveñas, Manzanillo, Pájaro, Puerto Velero, Punta de San Bernardo, Riohacha, Boca de la Tinajona y Tolú. A continuación se efectuará una breve descripción de cada una de ellas:

Pájaro es una playa ubicada en la parte media de la península de la Guajira, presenta una llanura costera en donde se aprecian amplias planicies ligeramente onduladas, limitadas hacia el interior por lomas y colinas y hacia el mar por la línea de costa, compuestas básicamente de gravas y arenas, se caracteriza por tener una pendiente en la zona de rompientes un poco pronunciada con un valor de 0.06, como se puede observar en la Figura 3. (DIMAR – CIOH 2013). El perfil de playa fue medido en diciembre del 2016.

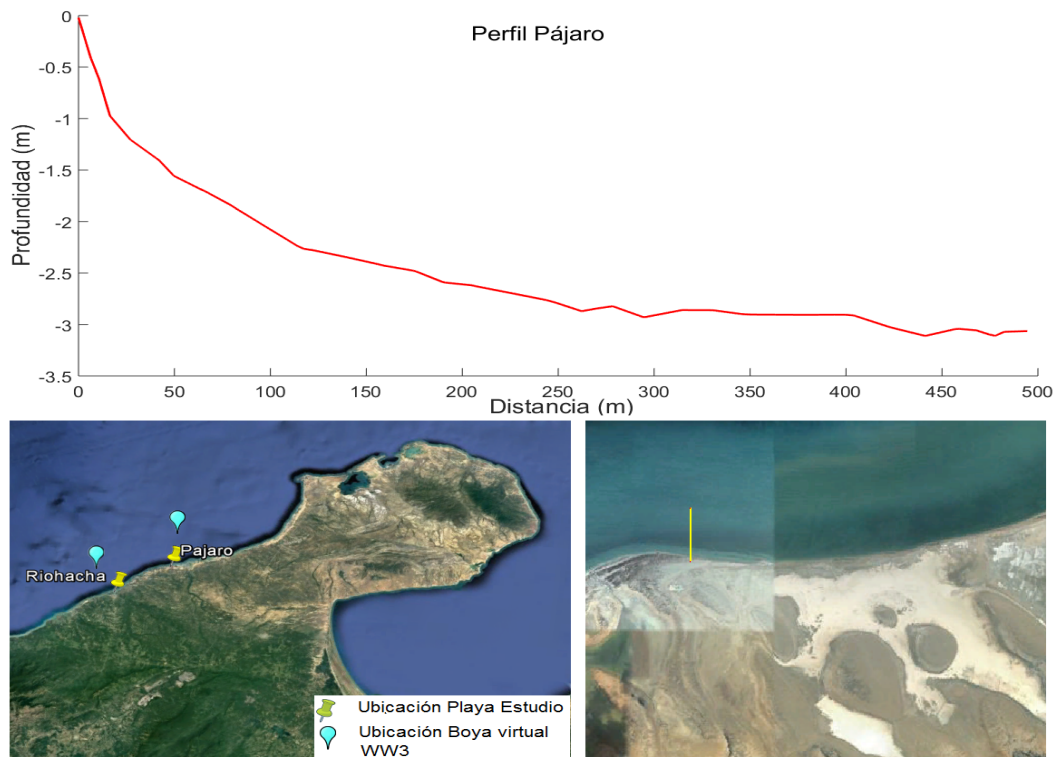


Figura 4: Localización de la zona de estudio en la playa de Pájaro ubicada en Guajira, Imagen de playa Pájaro.

Riohacha es una playa intervenida, ubicada en la parte media de la península de la Guajira, se caracteriza por un relieve plano con esporádicas ondulaciones asociadas a dunas, que han transgredido la zona litoral para depositarse sobre el plano deltaico, con un material sedimentario de gravas y arena, posee una pendiente en la zona de rompientes tendida con un valor de 0.02, como se puede ver en la Figura 4. (Rangel N, 2013). El perfil de playa fue medido en diciembre del 2016.

Costa Verde es una playa intermedia perteneciente al municipio de Ciénaga – Magdalena, posee elementos disipativos y reflejantes, con barras longitudinales, un perfil asimétrico, con 3 zonas de rompientes y con material de tamaño correspondiente a arenas medias gruesa con minerales cuarzosos, se encuentra asociado a una pendiente pronunciada de frente de playa de 0.06, como se observa en la Figura 5, (Merchan 2015). El perfil de playa fue medido en noviembre del 2016, por el grupo GEO4 de la Universidad del Norte.

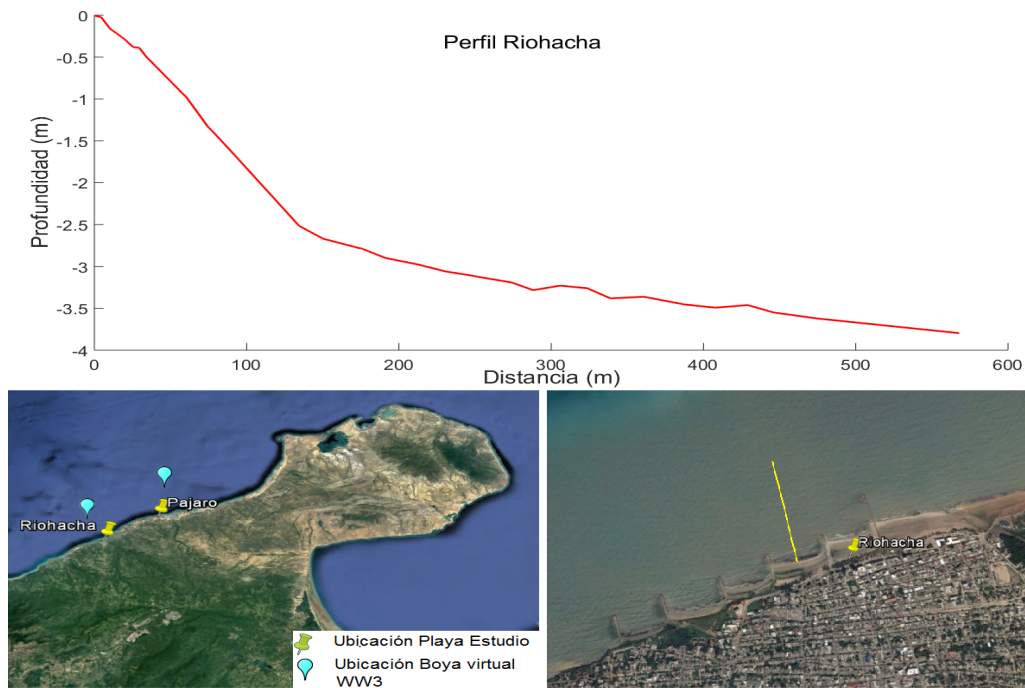


Figura 5: Localización de la zona de estudio en la playa de Riohacha ubicada en Guajira Imagen de playa Riohacha.

La playa de Puerto Velero pertenece al municipio de Tubará- Atlántico, es una playa amplia, con material sedimentario correspondiente a arena fina y minerales como cuarzo y feldespato, debido a los aportes provenientes del rio Magdalena, se pueden apreciar bermas de playas discontinuas y de poca altura, en forma de espigas, es una playa con una pendiente de rotura tendida de valor 0.02, como se puede observar en la Figura 6, (DIMAR – CIOH 2013). El perfil de playa fue medido en octubre del 2015.

Manzanillo del mar es una playa ubicada al norte del departamento de Bolívar, Es una llanura costera conformada por material arenoso y abundantes conchas, con una pendiente de rotura tendida con valor de 0.01, como se observa en la Figura 7, (DIMAR – CIOH 2013). El perfil fue medido en abril del 2011.

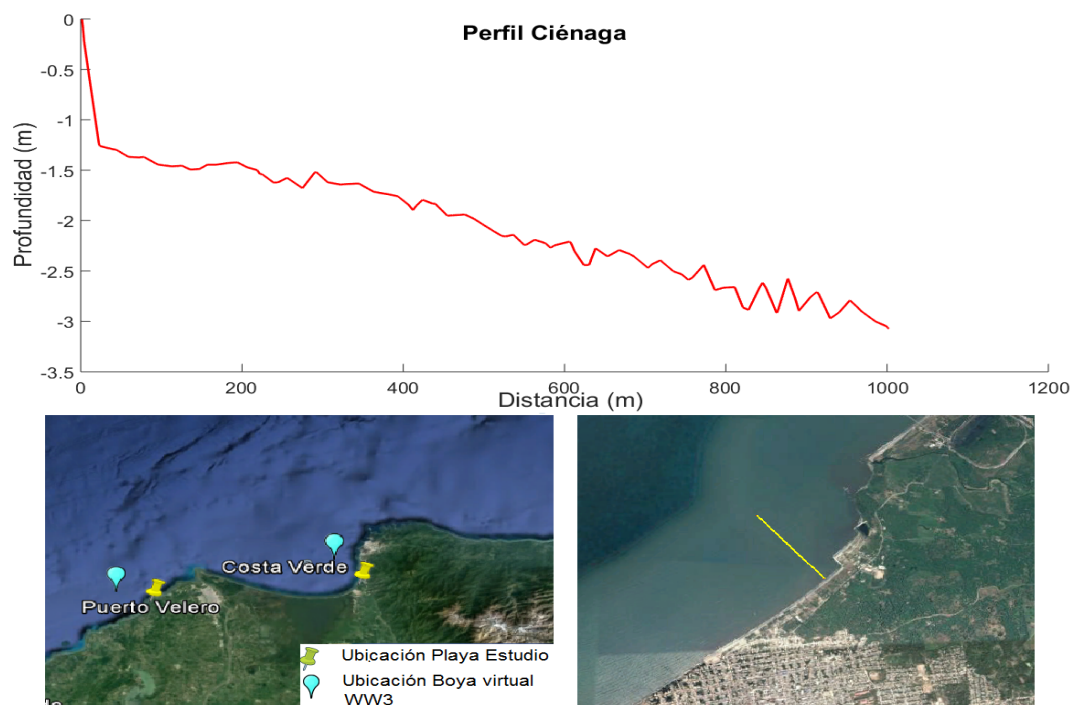


Figura 6: Localización de la zona de estudio en la playa de Costa Verde ubicada en Ciénaga. Imagen de playa Costa Verde.

Bocagrande es una playa intervenida ubicada en Cartagena, se caracteriza por tener una pendiente muy suave de tipo disipativa, con una zona de rompientes ancha, controlada por espolones en donde se observan dunas en su playa trasera de hasta 0.8m. Está constituida por sedimentos grises de grano fino a medio, como se puede observar en la Figura 8 (DIMAR – CIOH 2013). El perfil de playa fue medido en febrero del 2015.

Berrugas es una playa ubicada al norte del golfo de Morrosquillo, en el departamento de Sucre, se caracteriza por tener una superficie plana, con alturas entre 0,5 y 3m, labradas en caliza arrecifiales y material dentríco, originados a partir de procesos fluviales de sedimentación y erosión, con barras litorales y manglares, come se ve en la Figura 10 (DIMAR – CIOH 2013). El perfil fue medido en enero del 2013, por el grupo GEO4 de la Universidad del Norte.

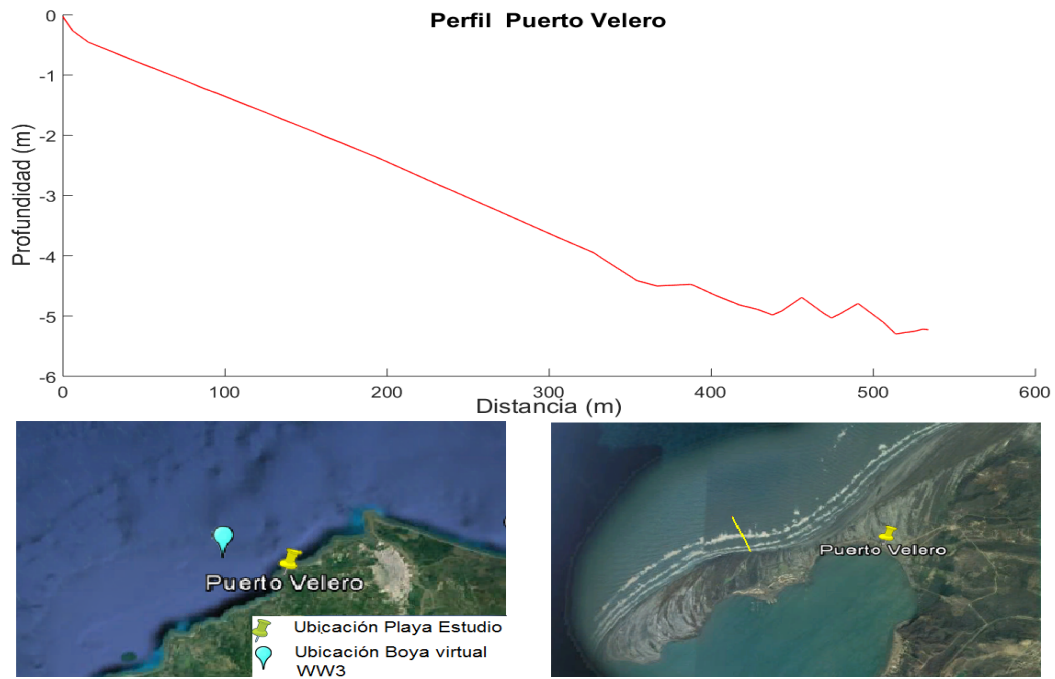


Figura 7: Localización de la zona de estudio en la playa de Puerto Velero ubicada en Atlántico Imagen de playa Puerto Velero.

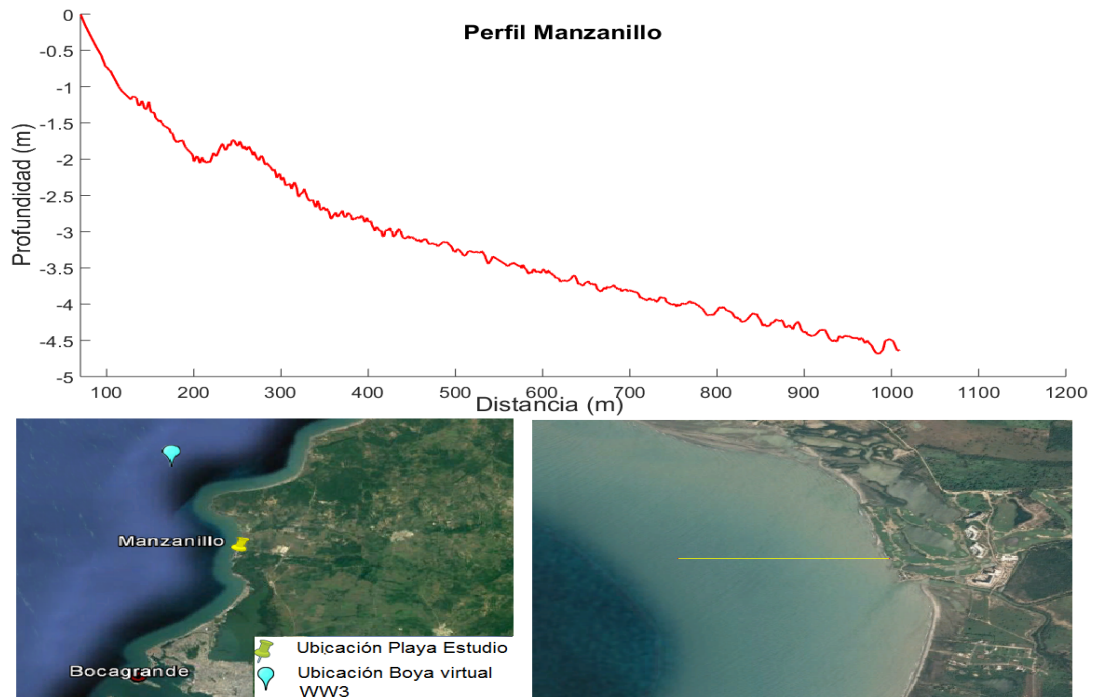


Figura 8: Localización de la zona de estudio en la playa de Manzanillo ubicada en Bolívar. Imagen de playa Manzanillo.

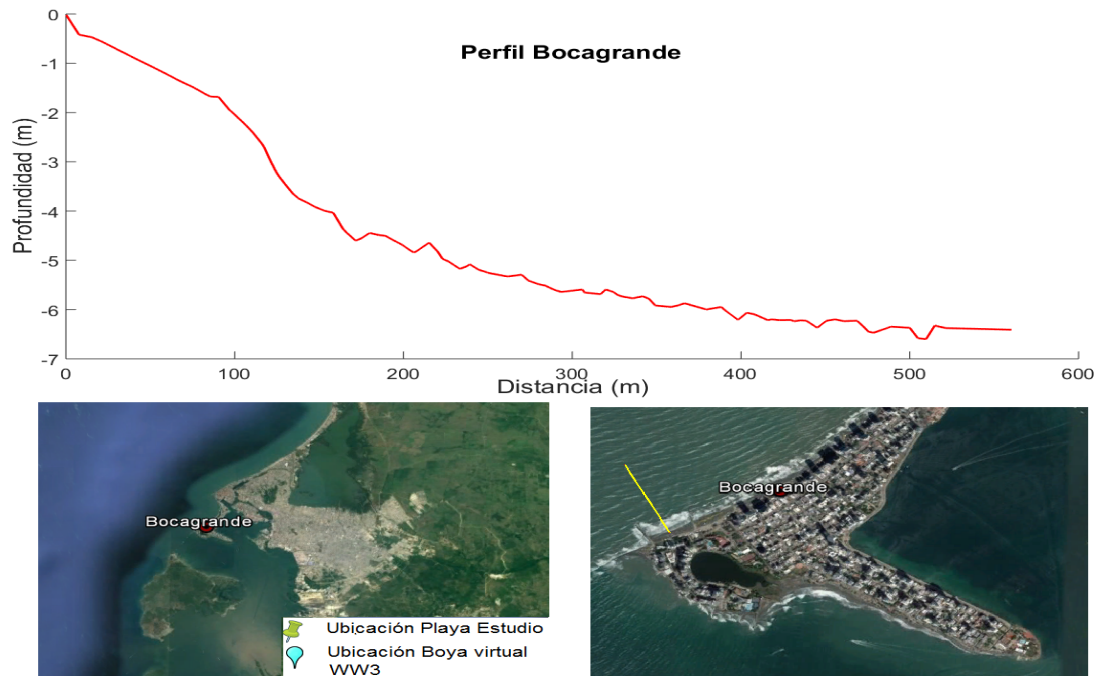


Figura 9: Localización de la zona de estudio en la playa de Bocagrande ubicada en Cartagena Imagen de playa Bocagrande.

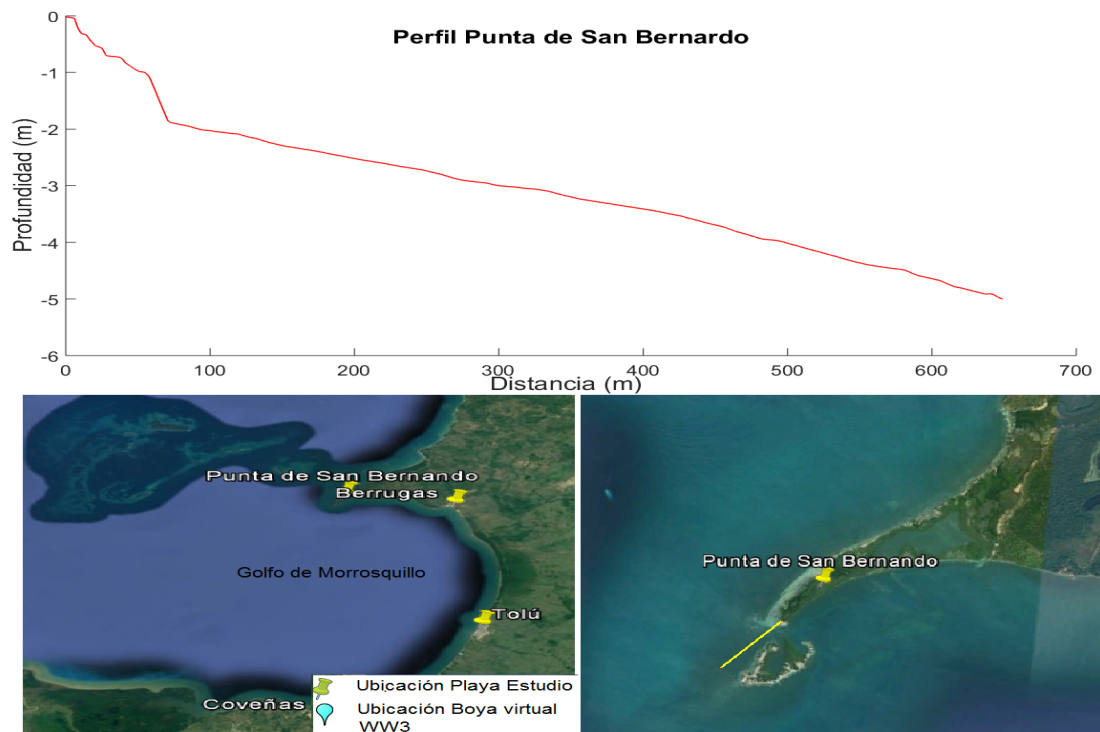


Figura 10: Localización de la zona de estudio en la playa de Punta de San Bernardo ubicada en Sucre Imagen de playa Punta de San Bernardo.

Tolú, es una playa ubicada en el golfo de Morrosquillo, en el departamento de Sucre, se caracteriza por ser una llanura costera de planicie levemente inclinada y ondulada, se encuentran franjas angosta de manglar, algunas lagunas costeras, complejos cordones litorales y antiguas barras litorales, con playas con un ancho máximo de 10m y afectadas por procesos de erosión del litoral, su pendiente de rotura es tendida de valor 0.06, como se ve en la Figura 11, (Carvajal. A. 2009). El perfil fue medido en enero del 2013, por el grupo GEO4 de la Universidad del Norte.

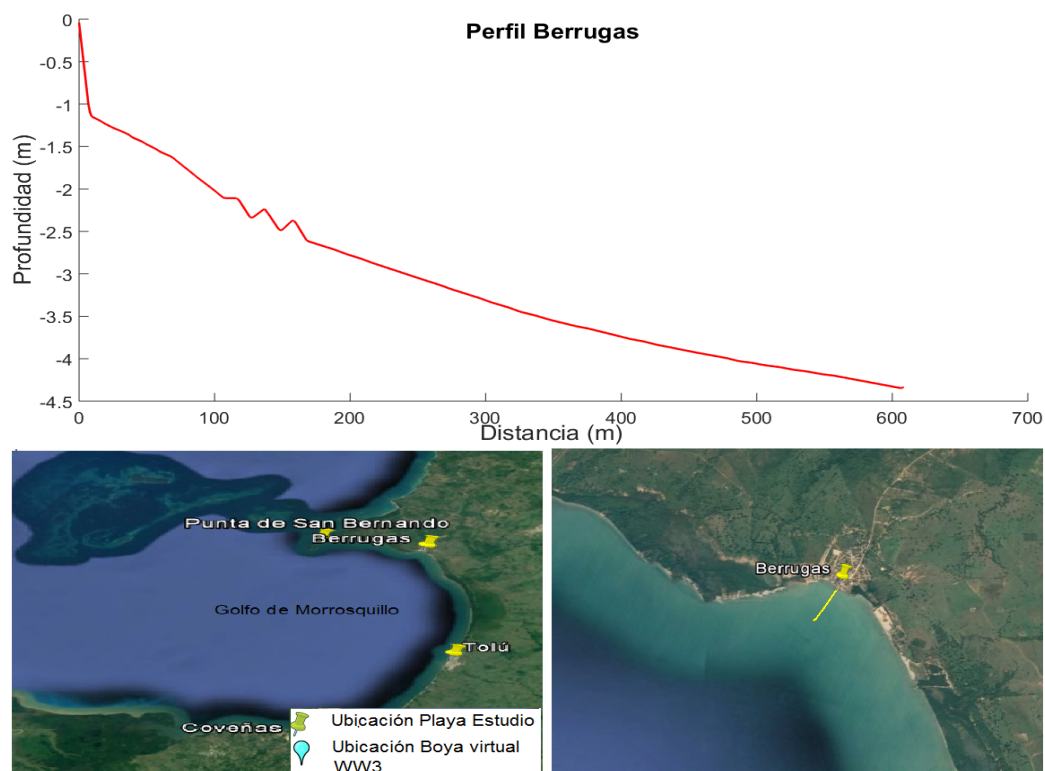


Figura 11: Localización de la zona de estudio en la playa Berrugas ubicada en sucre. Imagen de playa Berrugas.

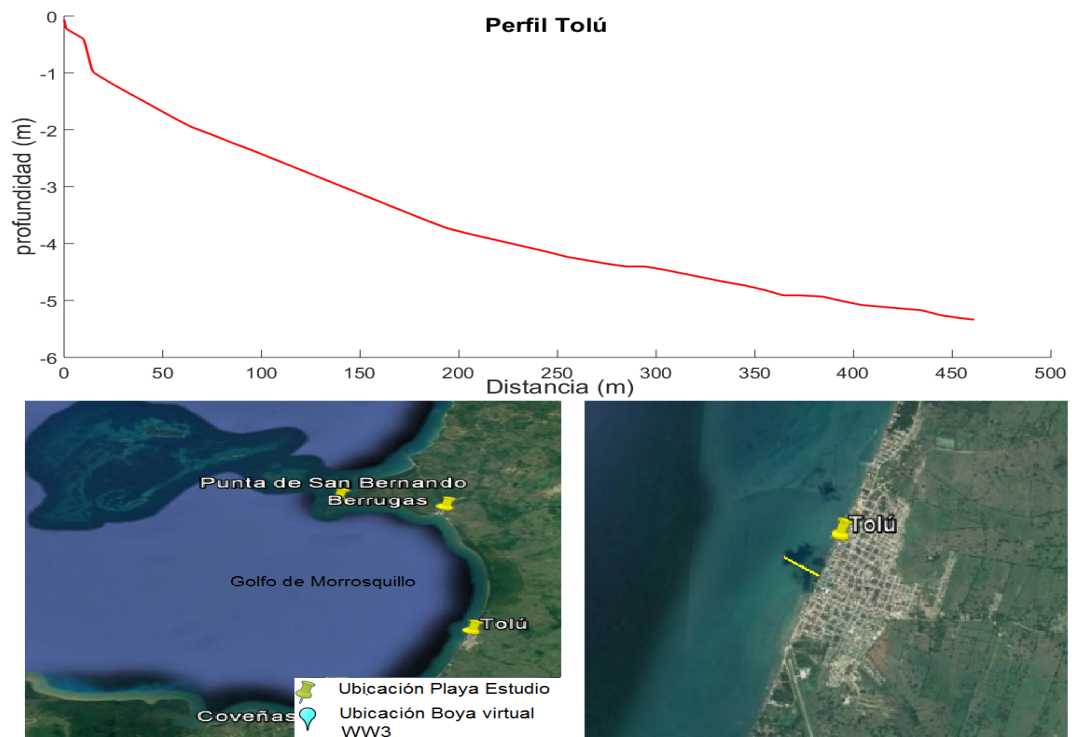


Figura 12: Localización de la zona de estudio en la playa de Tolú ubicada en Sucre. Imagen de playa Tolú.

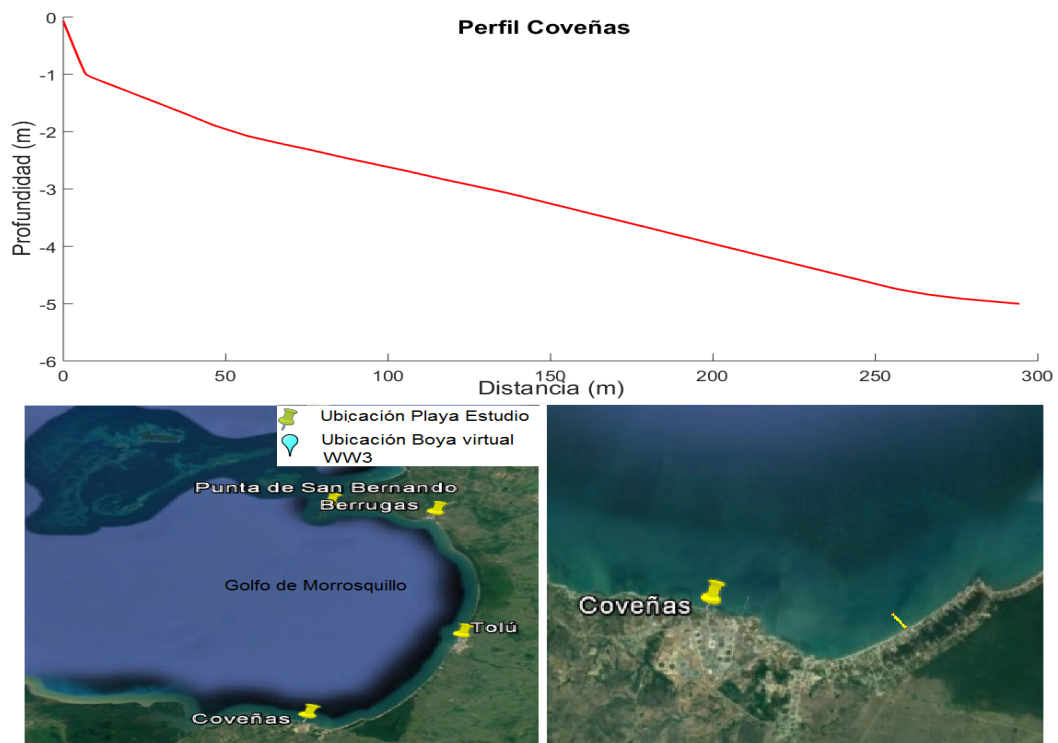


Figura 13: Localización de la zona de estudio en la playa de Coveñas ubicada en Sucre. Imagen de playa Coveñas.

Coveñas es una playa ubicada en el golfo de Morrosquillo, en el departamento de Sucre, presenta pequeñas terrazas marinas de 100m de ancho, con alturas entre 0,5 y 3m, labradas en caliza arrecifiales y material detrítico, tiene una pendiente de rotura pronunciada de valor 0.14, como se ve en la Figura 12, (Diagnostico PBOT, 2003). El perfil fue medido en enero del 2013, por el grupo GEO4 de la Universidad del Norte

Tinajones es una playa ubicada al sur del golfo de Morrosquillo, en el departamento de Sucre, presenta una llanura deltaica que se divide en tres brazos a la altura del punto de avulsión ubicado en el caserío Rodrigo Castillo. Tiene como forma característica de 'pata de ave' (*birdfoot*), típica de los deltas que desembocan en un mar de poca dinámica. Su playa tiene acreción sedimentaria, producto de la alta sedimentación desarrollada por el cauce del río Sinú, con una pendiente moderada, sedimentos terrígenos tipo arenas de medios a finos con gran cantidad de material de sobrelavado, resultante de la sedimentación del río Sinú, su pendiente de rotura es pronunciada, de valor 0.12, como se puede ver en la Figura 13, (DIMAR – CIOH 2013). El perfil fue medido en enero del 2013, por el grupo GEO4 de la Universidad del Norte.

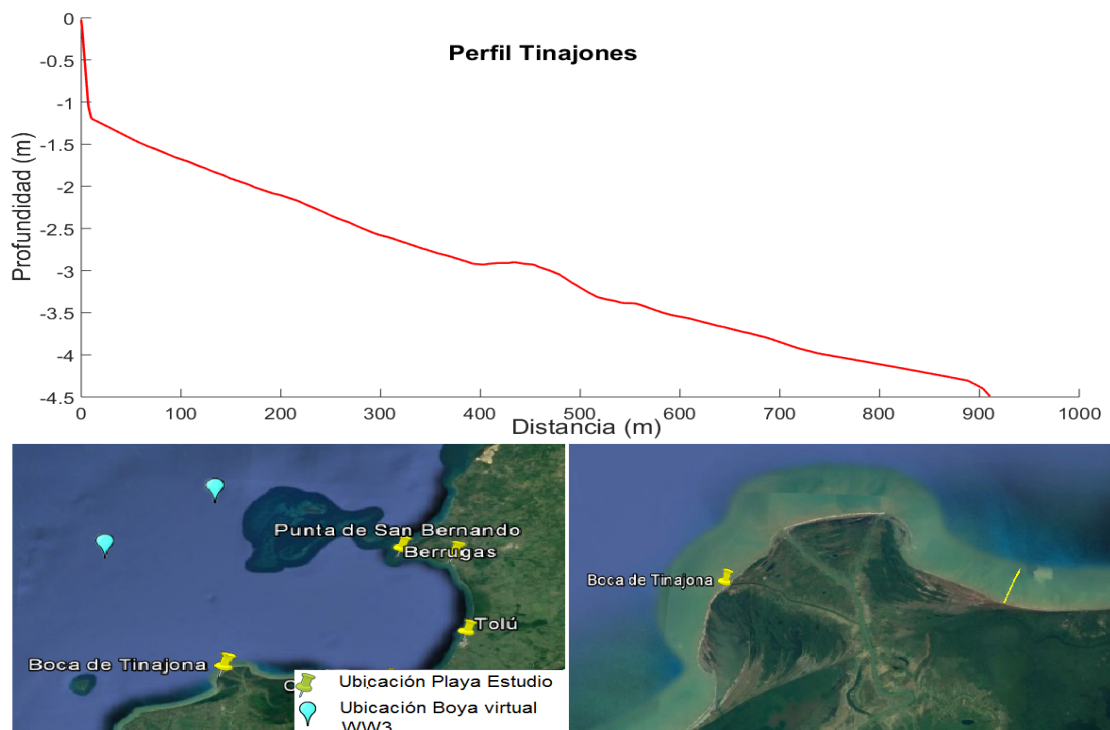


Figura 14: Localización de la zona de estudio en la playa de Tinajones ubicada en Córdoba Imagen de playa Tinajones.

2.2. ANÁLISIS DEL CLIMA MARÍTIMO

Las series de oleaje utilizadas en el presente trabajo fueron procesadas y calibradas bajo el proyecto “Programa de Investigación, desarrollo e Innovación de la protección de las zonas costeras en los departamentos de la Guajira y Magdalena”, mediante la comparación de diferentes bases de datos de reanálisis del Caribe Colombiano, (Ver Figura 2). Estas series cubren el periodo entre febrero 1979 a febrero 2017, y corresponden a estados de mar con resolución temporal de 3 horas.

A continuación se muestra el análisis de clima marítimo de cada una de las playas del caribe colombiano objeto de estudio, Ver figura 2.

2.2.1. PÁJARO - GUAJIRA

Se puede ver en la Figura 14, las series concerniente al registro histórico de las alturas significantes (Hs) y el periodo de pico (Tp) entre los años 1979 a 2017, en donde Hs tiene un rango desde 0,3 m hasta 3,7 m y Tp tiene valores entre 2,5 s y 20 s respectivamente. En la Figura también se muestra la rosa de oleaje y de periodos de pico, en la cual se evidencia que la dirección predominante del oleaje es NNE y el NE y las alturas de ola más probables están entre 0,5m y 1,5m y los periodos más probables están entre 2 s y 10 s.

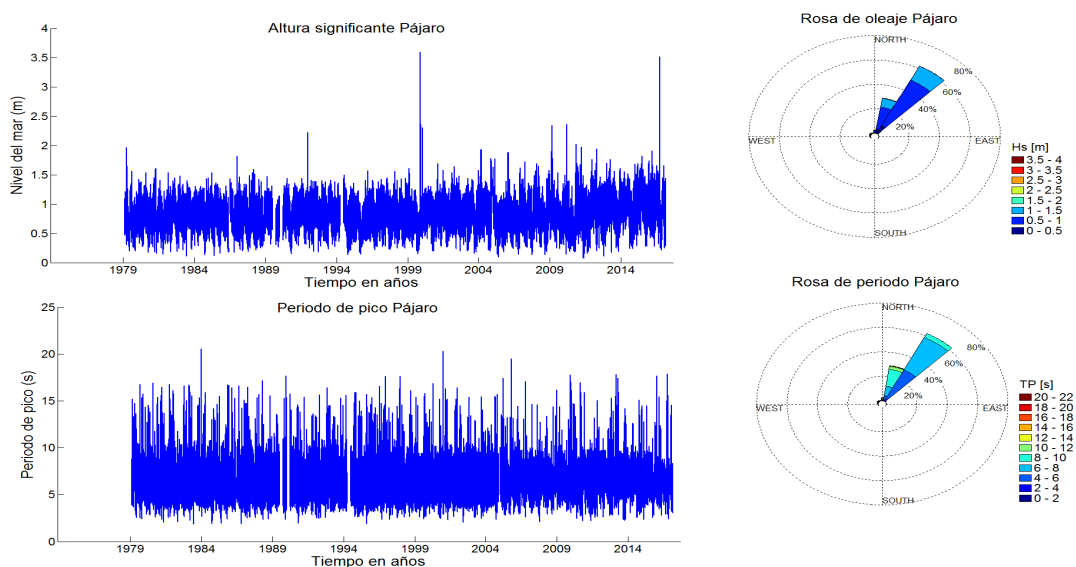


Figura 15: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Pájaro

En la Figura 15, se puede observar el histograma y la frecuencia acumulada para alturas significantes. Se puede observar que las alturas predominantes están entre 0,5 m y 1 m y el 50% del tiempo posee alturas menores o iguales a 0,5m.

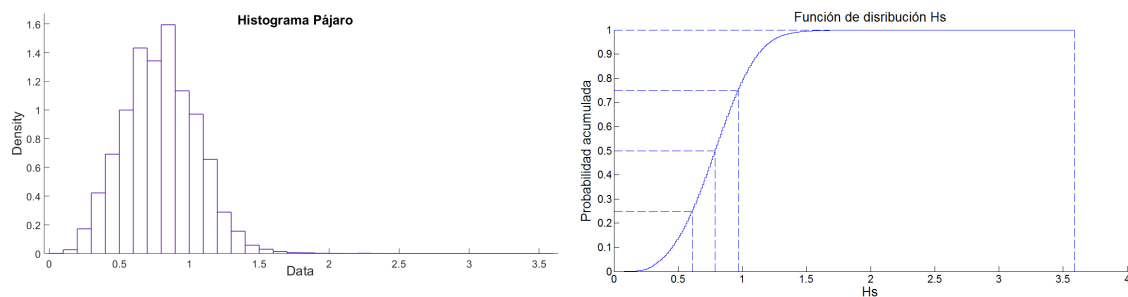


Figura 16: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Pájaro

En la tabla 4 se puede observar los estadísticos para las alturas significantes y su respectiva dirección predominante:

Tabla 4: Estadísticos Básicos HS Pájaro

Dirección	Prob dirección	HS;50%	HS;90%	HS;99%	Hsmax
N	0,03	0,63	1,17	1,84	3,03
NNE	0,85	0,80	1,13	1,41	2,34
NE	0,06	0,70	1,13	1,39	1,69
ENE	0,00	0,49	0,83	0,83	0,83
E	0,00	0,58	0,73	0,73	0,73
ESE	0,00	0,32	0,32	0,32	0,32
SE	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26
SSE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SSW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WSW	0,00	0,15	0,18	0,18	0,18
W	0,00	0,47	0,91	1,30	1,57
WNW	0,01	0,52	1,02	2,35	3,59
NW	0,02	0,63	1,09	1,72	3,20
NNW	0,00	0,54	1,00	1,62	3,51

En la tabla 4 se puede observar que la dirección predominante es el NNE con un 84% de probabilidad con alturas de 0,8 m y 1,4 m y una altura máxima de

2.3 m, sin embargo también se presentan direcciones importantes al N con una probabilidad del 3,3% y una altura máxima de 3 m aproximadamente, NE con una probabilidad del 6% y altura máxima de 1,7 m, NE, se presenta la máxima altura en dirección NNW de 3.5 m, por la posición de la línea de costa, con respecto al oleaje procedente en esa dirección.

2.2.2. RIOHACHA - GUAJIRA

En la Figura 16 se puede apreciar las series concerniente al registro histórico de las alturas significantes (Hs) y el periodo de pico el (Tp) entre los años 1979 al 2017, en donde Hs tienen un rango desde 0,3 m hasta 3,5 m y Tp tiene valores entre 2 s y 20 s respectivamente. En las rosas de oleaje y periodo podemos observar que las alturas predominantes están entre 0,5 m y 1,5 m y periodos de pico entre 4 s y 10 s en dirección NE y NNE.

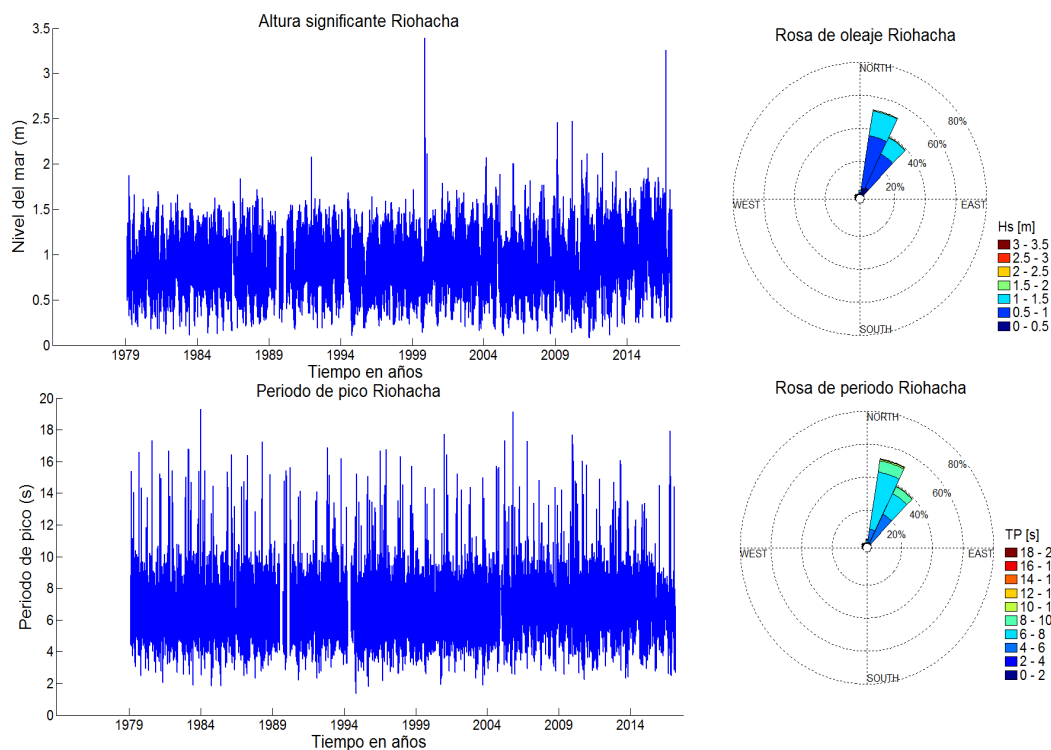


Figura 17: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Riohacha

En la Figura 17, perteneciente al histograma y a la frecuencia acumulada para alturas significantes, se puede observar que las alturas predominante están

entre 0,5 m y 1 m y el 50% del tiempo posee alturas menores o iguales a 0,5 m.

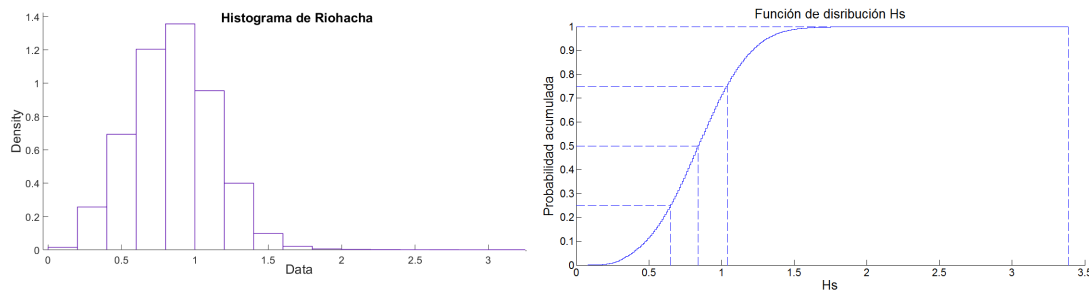


Figura 18: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Riohacha

En la tabla 5 se puede observar que la dirección predominante es el NNE con un 79%, con alturas de 0.8 m y 1.5 m y una altura máxima de 2.5 m, sin embargo también se presentan direcciones importantes al N con una probabilidad del 4.3% y una altura máxima de 3.3 m y al NE con una probabilidad del 10% y altura máxima de 1.9m, la máxima altura se presenta en WNW, con un valor de 3,4 m.

Tabla 5: Estadísticos Básicos HS Riohacha

Dirección	Prob dirección	HS;50%	HS;90%	HS;99%	Hsmax
N	0,04	0,93	1,32	1,80	3,26
NNE	0,79	0,85	1,21	1,49	2,46
NE	0,11	0,83	1,24	1,56	1,96
ENE	0,00	0,29	0,29	0,29	0,29
E	0,00	0,61	0,68	0,68	0,68
ESE	0,00	0,89	0,89	0,89	0,89
SE	0,00	0,27	0,27	0,27	0,27
SSE	0,00	1,01	1,01	1,01	1,01
S	0,00	0,23	0,23	0,23	0,23
SSW	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26
SW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WSW	0,00	0,17	0,18	0,18	0,18
W	0,00	0,43	0,85	1,28	1,35
WNW	0,01	0,54	1,02	2,20	3,39
NW	0,02	0,65	1,14	1,79	3,20
NNW	0,00	0,53	1,00	1,44	2,44

2.2.3. COSTA VERDE – CIÉNAGA

En la Figura 18 se pueden ver la serie de datos concerniente al registro histórico de las alturas significantes (H_s) y el periodo de pico (T_p) entre los años 1979 al 2015, en donde podemos ver que H_s tienen un rango desde 0,3 m hasta 3,4 m y el T_p tiene valores entre 2 s y 18 s respectivamente y en la rosa de oleaje y la de periodo se evidencia la dirección predominante de las olas que llegan a la playa. Las barras indican la dirección de donde provienen las olas y los colores muestran la altura significativa en metros para la de oleaje y el periodo en segundos para la de periodo. La dirección predominante del oleaje es NE y las alturas de ola más probables están entre 1,0 m y 1,5 m y 1,5 m y 2 m y los periodos más probables están entre 6 s y 10 s.

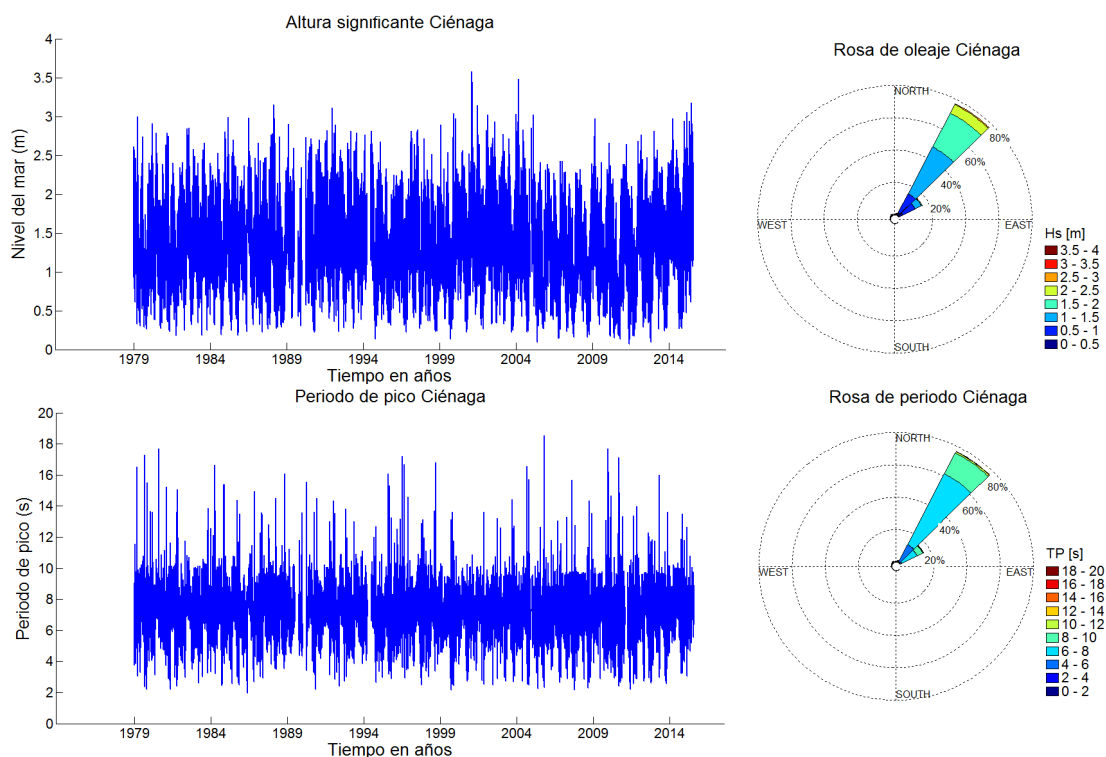


Figura 19: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico en Ciénaga.

En la Figura 19 se observan el histograma y la función de probabilidad acumulada, en donde podemos ratificar que las alturas de ola más probables están en el rango de 1 m a 2 m y que 50% del tiempo los oleajes en aguas profundas en ciénaga presentan alturas de ola menores o iguales a 1,2 m.

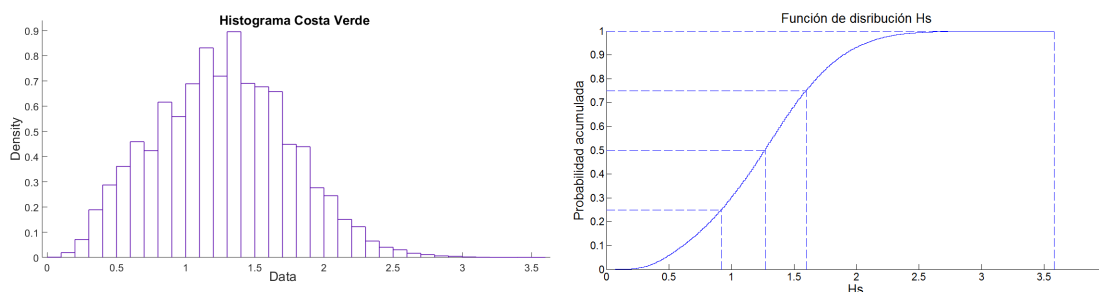


Figura 20: Histograma y frecuencia acumulada para Hs en Ciénaga.

En la tabla 6 se observa la probabilidad de obtener las diferentes direcciones y sus alturas correspondientes.

Tabla 6: Estadísticos Básicos HS Costa Verde

Dirección	Prob dirección	HS;50%	HS;90%	HS;99%	HSmax
N	0,01	0,61	1,15	2,36	2,61
NNE	0,15	1,26	1,90	2,49	3,48
NE	0,79	1,29	1,91	2,42	3,58
ENE	0,00	0,31	0,44	0,67	0,69
E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ESE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SSE	0,00	0,66	0,94	0,99	0,99
S	0,00	0,60	0,82	1,12	1,17
SSW	0,00	0,57	0,84	1,14	1,14
SW	0,00	0,66	0,96	0,96	0,96
WSW	0,00	0,23	0,76	0,76	0,76
W	0,00	0,52	0,97	1,34	1,44
WNW	0,00	0,55	0,96	2,45	2,73
NW	0,01	0,84	1,52	1,99	2,24
NNW	0,00	0,68	1,35	1,83	2,29

En la tabla 6 se puede observar que la dirección predominante es el NE con un 78.8% de probabilidad con alturas de 0.6m y 2.4m y una altura máxima de 3.6m, sin embargo también se presentan direcciones importantes al NNE con una probabilidad del 15.5% y una altura máxima de 3.5m y esporádicamente al NW con una probabilidad del 1.2% y altura máxima de 2.2m, siendo en la

dirección NNE donde el oleaje alcanza su máxima altura debido a la posición de la línea de costa, con respecto al oleaje en esa dirección.

2.2.4. PUERTO VELERO- ATLÁNTICO.

En la Figura 20 se pueden ver las series concerniente al registro histórico de las alturas significantes (H_s) y el periodo de pico (T_p) entre los años 1979 al 2015, en donde podemos H_s tiene un rango desde 0,3m hasta 3,5m y T_p tiene valores entre 2s y 16s respectivamente. En las rosas de oleaje y periodo podemos observar que las alturas predominantes están entre 1m y 2m y periodos de pico entre 6s y 8s en dirección NE.

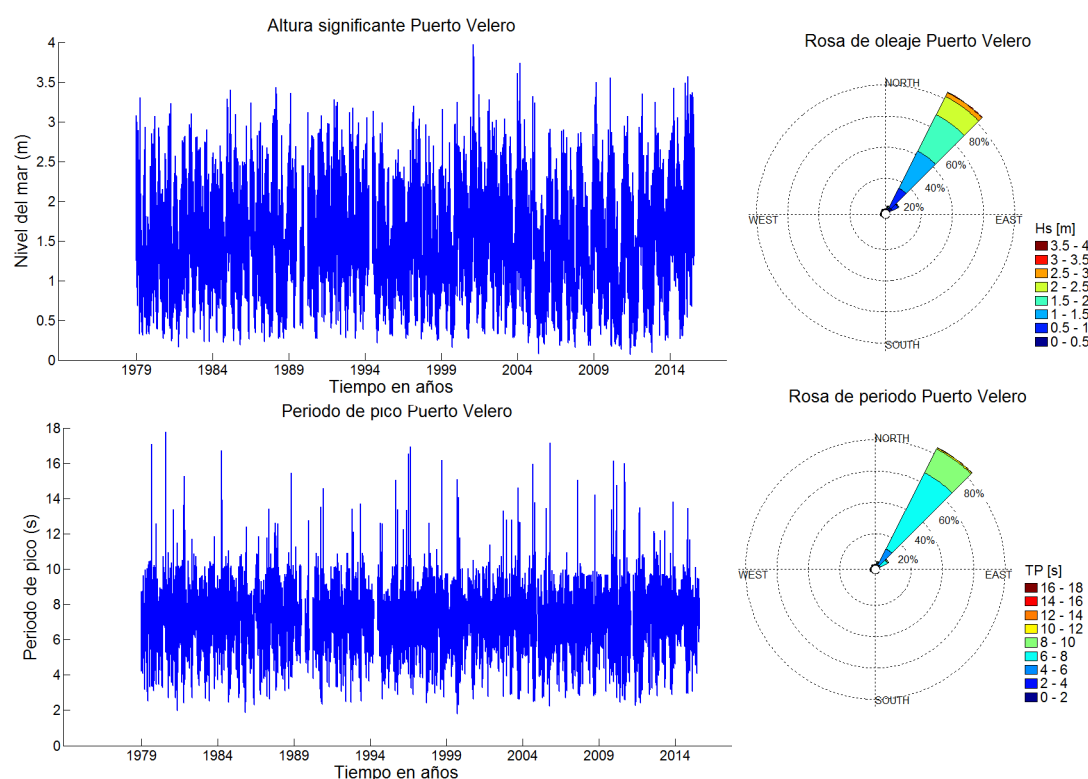


Figura 21: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Puerto Velero

En la Figura 21, perteneciente al histograma y a la frecuencia acumulada para alturas significantes se puede observar que las alturas predominante están entre 1m y 2m y el 50% del tiempo posee alturas menores o iguales a 1,3m

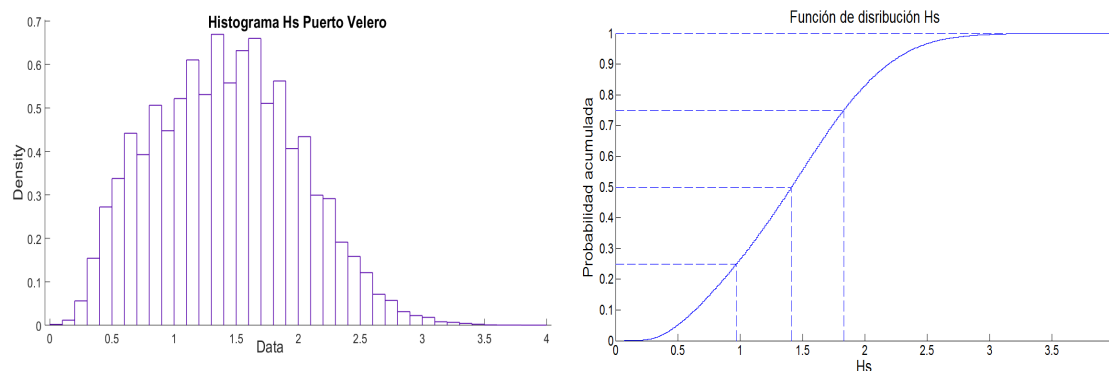


Figura 22: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Puerto Velero

En la tabla 7 se observar la probabilidad de obtener las diferentes direcciones y sus alturas correspondientes.

Tabla 7: Estadísticos Básicos HS Puerto Velero

Dirección	Prob dirección	HS;50%	HS;90%	HS;99%	Hsmax
N	0,01	0,72	1,47	2,72	2,97
NNE	0,46	1,63	2,32	2,87	3,97
NE	0,48	1,23	2,01	2,66	3,57
ENE	0,00	0,33	0,46	0,71	0,71
E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ESE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SE	0,00	0,45	0,54	0,54	0,54
SSE	0,00	0,52	0,56	0,56	0,56
S	0,00	0,60	0,62	0,62	0,62
SSW	0,00	0,48	0,60	0,60	0,60
SW	0,00	0,44	0,89	0,91	0,91
WSW	0,01	0,53	0,97	1,49	2,03
W	0,00	0,62	1,15	1,66	2,03
WNW	0,00	0,55	0,93	2,03	2,26
NW	0,01	0,84	1,86	2,54	2,96
NNW	0,00	0,74	1,64	2,10	2,62

En la tabla 7 se puede observar que las direcciones predominantes son el NE con un 47.5% de probabilidad y el NNE con un 46.4%, con alturas de 1.6m y 2.9m y una altura máxima de 3.9m y 1.2m y 2.7m con una máxima de 3.6m, respectivamente, sin embargo también se presentan direcciones importantes al N con una probabilidad del 0.6% y una altura máxima de 2.9m y al NW con una probabilidad del 0.7% y altura máxima de 2.9m, siendo estas alturas

máxima importantes debido a la posición de la línea de costa, con respecto al oleaje de esta dirección.

2.2.5. MANZANILLO – BOLIVAR

En la Figura 22 se pueden apreciar las series concerniente al registro histórico de las alturas significantes (H_s) y el periodo de pico (T_p) entre los años 1979 al 2015, en donde H_s tiene un rango desde 0,3m hasta 2,8m y el T_p tiene valores entre 2s y 18s respectivamente. En la figura también se muestra la rosa de oleaje y de periodos de pico, en la cual se evidencia que la dirección predominante del oleaje es NNE y las alturas de ola más probables están entre 0,5 y 1 m y 1m y 1,5m y los periodos más probables están entre 7s y 9s.

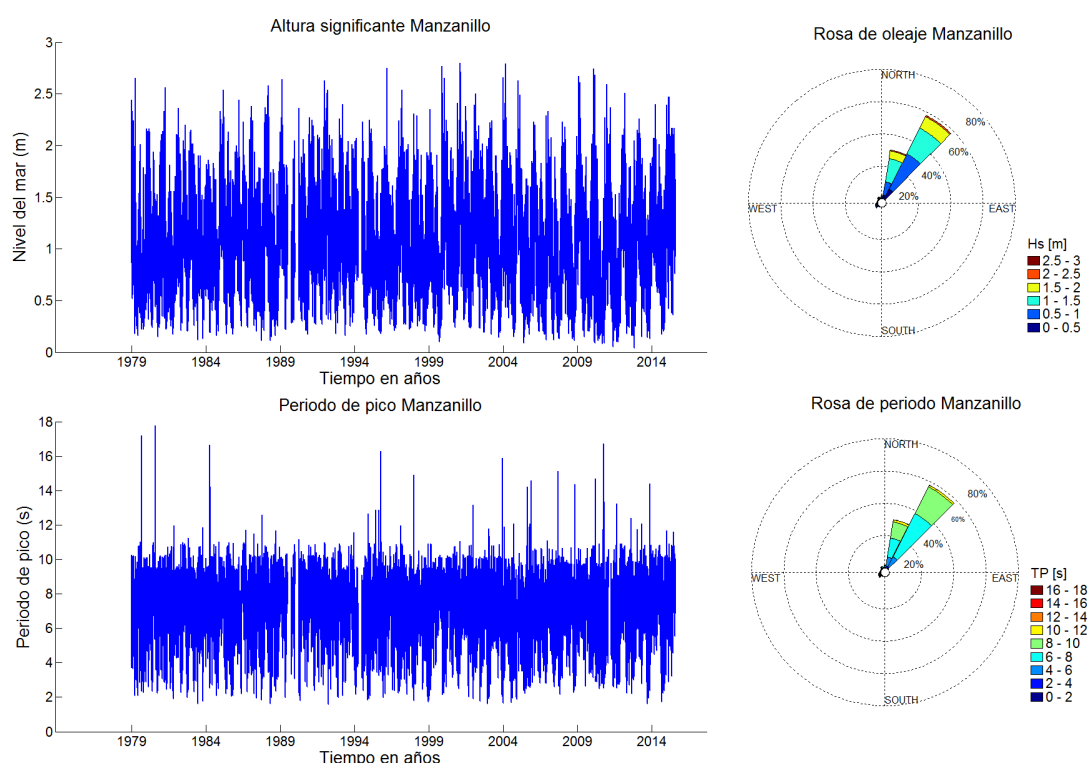


Figura 23: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Manzanillo.

Para la variable direccional altura de ola significativa, H_s , se han obtenido además otros descriptores básicos, como el histograma y la función de probabilidad acumulada que se pueden observar en la Figura 23, en donde las alturas de ola más probables están en el rango de 1m a 2m y que el 50% del tiempo los oleajes en aguas profundas en Manzanillo presentan alturas de ola menores o iguales a 1 m.

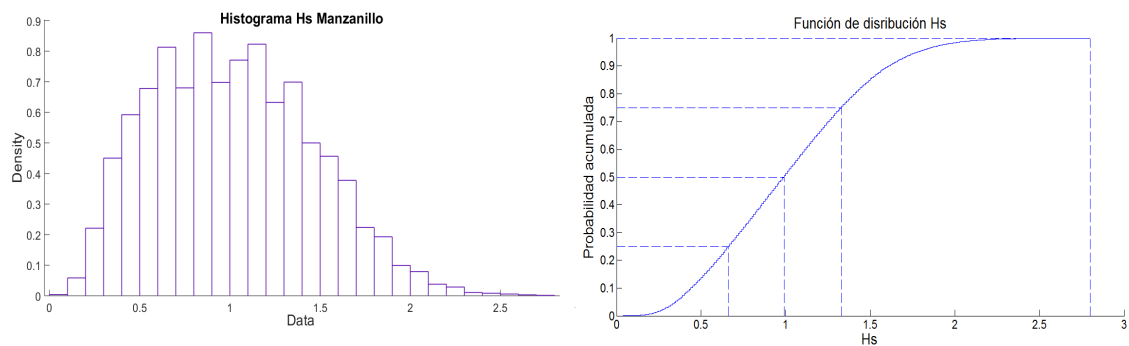


Figura 24: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Manzanillo

En la tabla 8 se observar la probabilidad de obtener las diferentes direcciones y sus alturas correspondientes.

Tabla 8: Estadísticos Básicos HS Manzanillo

Dirección	Prob dirección	HS;50%	HS;90%	HS;99%	Hsmax
N	0,02	0,68	1,41	2,12	2,68
NNE	0,86	1,04	1,63	2,10	2,80
NE	0,02	0,36	0,51	0,65	0,96
ENE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E	0,00	0,19	0,19	0,19	0,19
ESE	0,00	0,28	0,30	0,30	0,30
SE	0,00	0,31	0,36	0,37	0,37
SSE	0,00	0,29	0,68	0,75	0,75
S	0,00	0,31	0,40	0,42	0,42
SSW	0,00	0,38	0,79	1,06	1,06
SW	0,01	0,53	0,89	1,36	1,67
WSW	0,02	0,48	0,90	1,61	2,16
W	0,00	0,45	1,05	1,59	2,22
WNW	0,00	0,42	0,87	1,76	2,31
NW	0,01	0,66	1,68	2,37	2,77
NNW	0,00	0,61	1,47	1,99	2,59

En la tabla 8 se puede observar que la dirección predominante es el NNE con un 86.2% de probabilidad con alturas de 1.0m y 2.1m y una altura máxima de 2.8 m, sin embargo también se presentan direcciones importantes al N con una probabilidad del 2,3% y una altura máxima de 2,7m, WNW con una probabilidad del 2.2% y altura máxima de 2.2m, NE donde el oleaje alcanza

una altura máxima de 0.96m con un porcentaje de 1,8% y esporádicamente al NW con un 1.2% con una altura máxima importante de 2.8m.

2.2.6. BOCAGRANDE- CARTAGENA.

En la Figura 24 se pueden ver la serie de datos concerniente al registro histórico de las alturas significantes (Hs) y el periodo de pico (Tp) entre los años 1979 al 2015, en donde podemos ver que Hs tienen un rango desde 0,3 m hasta 2,5 m y el Tp tiene valores entre 2 s y 16 s respectivamente y la rosa de oleaje y periodo, en la cual se puede ver que la dirección predominante del oleaje es Nornordeste y las alturas de ola más probables están entre 0,5 m y 1 m y 1,5 m y los periodos más probables están entre 6 s y 10 s.

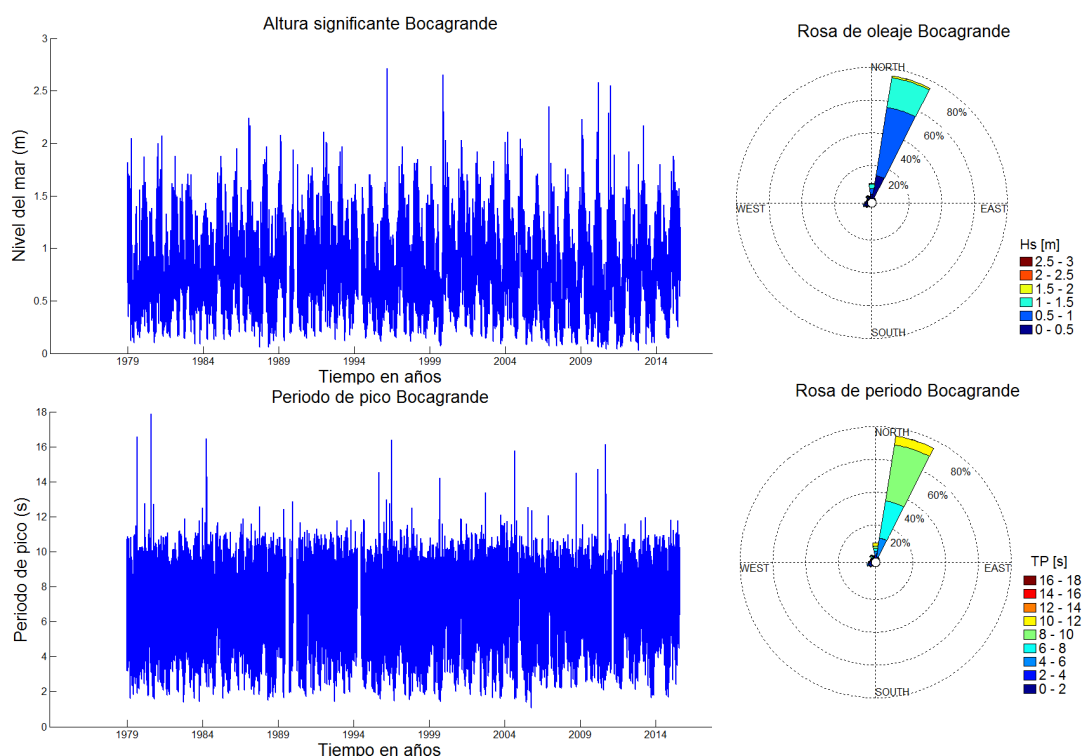


Figura 25: Registro histórico y rosa para alturas significantes (Hs) y periodo de pico (Tp) en Bocagrande.

Para la variable direccional altura de ola significativa, Hs, podemos ratificar por medio de un histograma y un diagrama de frecuencia acumulada mostradas en la Figura 25, que las alturas de ola más probables están en el rango de 0,5 m a 1 m y que el 50% del tiempo los oleajes en aguas profundas en Bocagrande presentan alturas de ola menores o iguales a 0.7 m

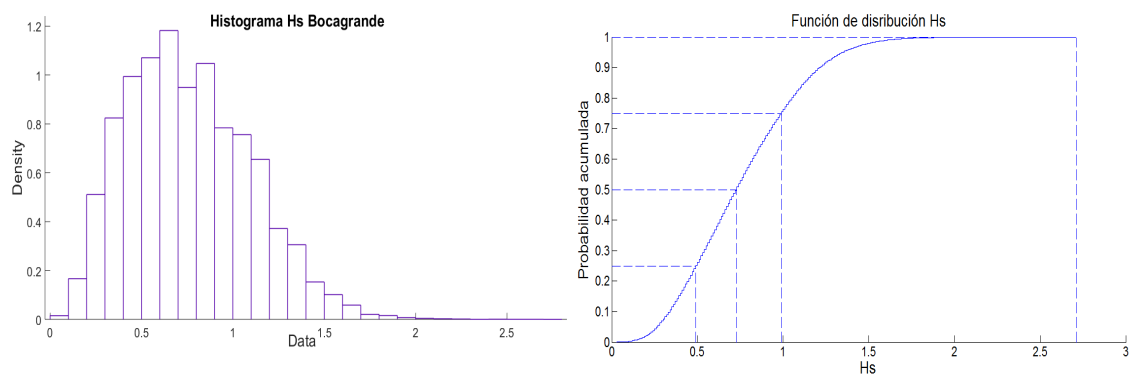


Figura 26: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Bocagrande

En la tabla 9 se puede observar la probabilidad de obtener las diferentes direcciones y sus alturas correspondientes.

Tabla 9: Estadísticos Básicos de HS Bocagrande

Dirección	Prob dirección	HS;50%	HS;90%	HS;99%	HSmax
N	0,16	0,91	1,39	1,76	2,58
NNE	0,70	0,75	1,18	1,53	2,08
NE	0,00	0,19	0,30	0,30	0,30
ENE	0,00	0,20	0,22	0,22	0,22
E	0,00	0,19	0,44	0,48	0,48
ESE	0,00	0,22	0,29	0,33	0,33
SE	0,00	0,25	0,33	0,34	0,34
SSE	0,00	0,25	0,36	0,66	0,66
S	0,00	0,27	0,41	0,63	0,63
SSW	0,00	0,34	0,55	0,68	0,68
SW	0,01	0,45	0,72	1,07	1,26
WSW	0,03	0,40	0,69	1,25	1,96
W	0,00	0,38	0,74	1,39	2,07
WNW	0,01	0,38	0,70	1,39	2,26
NW	0,02	0,49	1,35	2,21	2,71
NNW	0,00	0,52	1,22	1,83	2,55

En la tabla 9 se puede observar que la dirección predominante es el NNE con un 70% de probabilidad con alturas de 0.7m y 1.5m y una altura máxima de 2.1m, sin embargo también se presentan direcciones importantes al N con una

probabilidad del 15% y una altura máxima de 2,6m y esporádicamente al NW con una probabilidad del 2% y altura máxima de 2,7m, siendo en esta dirección donde el oleaje alcanza su máxima altura debido al que el oleaje incide perpendicular a su línea de costa.

2.2.7. BERRUGA- SUCRE Y PUNTA DE SAN BERNARDO- BOLIVAR

En la Figura 26 se pueden ver la serie de datos concerniente al registro histórico de las alturas significantes (Hs) y el periodo de pico (Tp) entre los años 1979 al 2017, en donde podemos ver que Hs tienen un rango desde 0,3 m hasta 2,7 m y el Tp tiene valores entre 2 s y 18 s respectivamente y la rosa de oleaje y periodo, en la cual se puede ver que las direcciones predominante del oleaje es Norte y Nornordeste y las alturas de ola más probables están entre 0,5 y 1 m y 1m y 1,5m, y los periodos más probables están entre 6 s y 10 s y en la dirección N los periodos más frecuentes oscilan entre 10 s y 12 s.

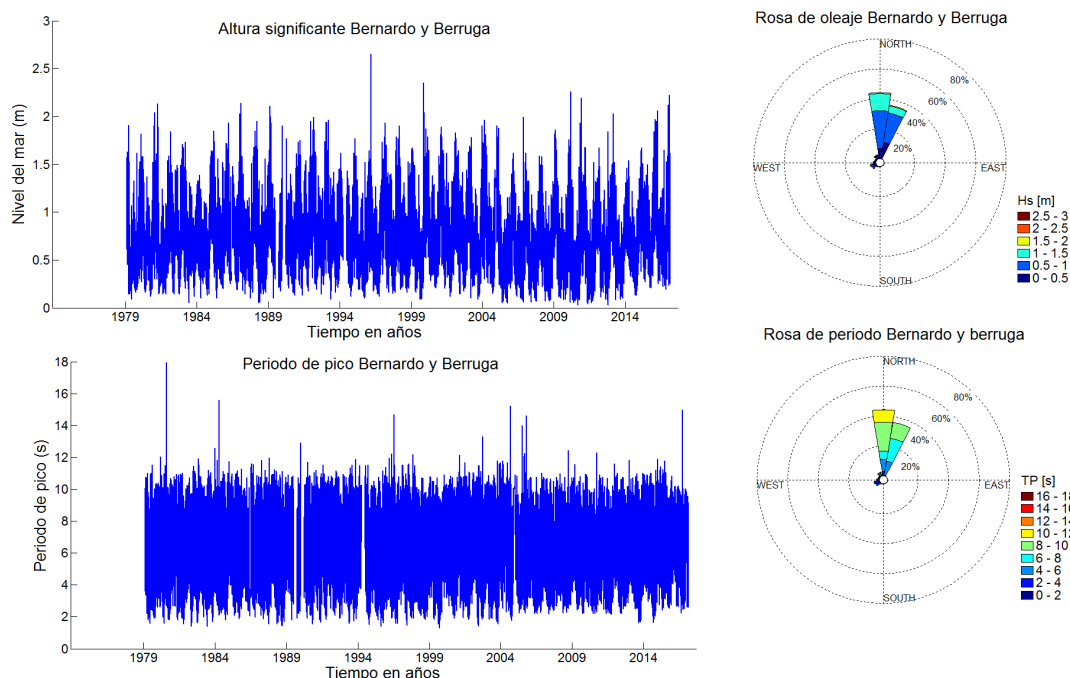


Figura 27: Registro histórico y rosa para alturas significantes (Hs) y periodo de pico (Tp) en Berruga y Punta de San Bernardo

Para la variable direccional altura de ola significativa, Hs, podemos ratificar por medio de un histograma y un diagrama de frecuencia acumulada mostradas en

la Figura 27, que las alturas de ola más probables están en el rango de 0,5m a 1 m y que el 50% del tiempo los oleajes en aguas profundas en Berruga y Punta de San Bernardo presentan alturas de ola menores o iguales a 0.6 m.

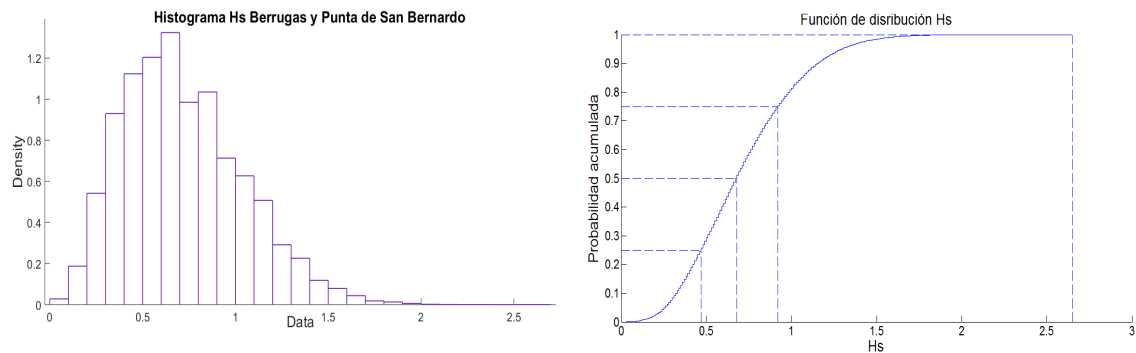


Figura 28: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Berruga y Punta San Bernardo

La probabilidad de obtener las diferentes direcciones y sus alturas correspondientes se puede observar en la tabla 10:

Tabla 10: Estadísticos Básicos de HS Berruga y Punta de San Bernardo

Dirección	Prob dirección	HS;50%	HS;90%	HS;99%	HSmax
N	0,53	0,80	1,20	1,56	2,22
NNE	0,28	0,60	1,09	1,56	2,13
NE	0,00	0,45	0,62	0,66	0,66
ENE	0,00	0,25	0,55	0,63	0,63
E	0,00	0,29	0,56	1,04	1,04
ESE	0,00	0,29	0,54	0,98	0,99
SE	0,00	0,30	0,47	0,88	0,88
SSE	0,00	0,31	0,45	0,81	0,84
S	0,00	0,34	0,65	0,89	0,91
SSW	0,00	0,52	0,81	1,00	1,12
SW	0,02	0,54	0,83	1,16	1,52
WSW	0,05	0,44	0,74	1,28	1,84
W	0,00	0,41	0,70	1,38	1,92
WNW	0,01	0,41	0,70	1,38	2,25
NW	0,02	0,47	1,25	2,02	2,65
NNW	0,00	0,56	1,20	1,78	2,26

En la tabla 10 se pueden observar que las direcciones predominantes son al Norte con un 53% y al Nornordeste 28%, con alturas de 0.6 m a 1.56 m y una altura máxima de 2.2 m, y esporádicamente al NW con una probabilidad del 2,6% y altura máxima de 2,65 m, siendo en esta dirección donde el oleaje alcanza su máxima altura debido a la orientación de la línea de costa.

2.2.8. TOLÚ- SUCRE

En la Figura 28 se pueden observar las series de las alturas significantes (H_s) y el periodo de pico (T_p) entre los años 1979 al 2017, en donde H_s tiene un rango desde 0,3 m hasta 3 m y el T_p tiene valores entre 2 s y 18 s respectivamente. En las rosas de oleaje y periodo podemos observar que las alturas predominantes están entre 0,5 m y 2 m y periodos de pico entre 4 s y 12 s en dirección NNE.

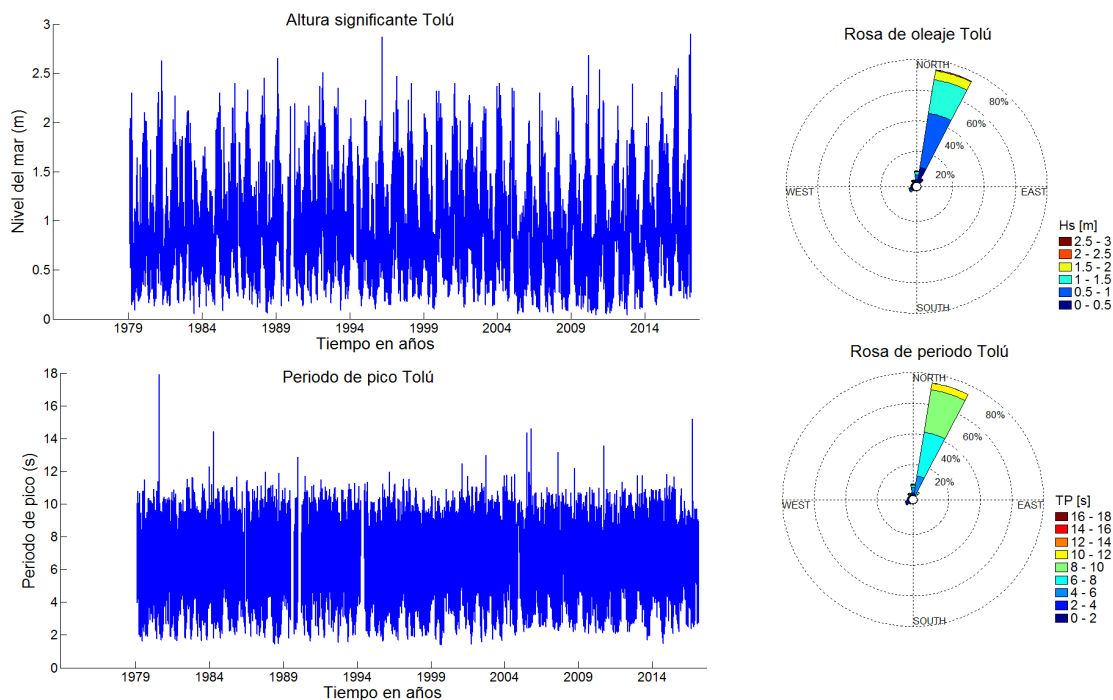


Figura 29: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Tolú

En la Figura 29, perteneciente al histograma y a la frecuencia acumulada para alturas significantes se puede observar que las alturas predominantes están entre 0,5 m y 1,2 m y el 50% del tiempo posee alturas menores o iguales a 0,7 m.

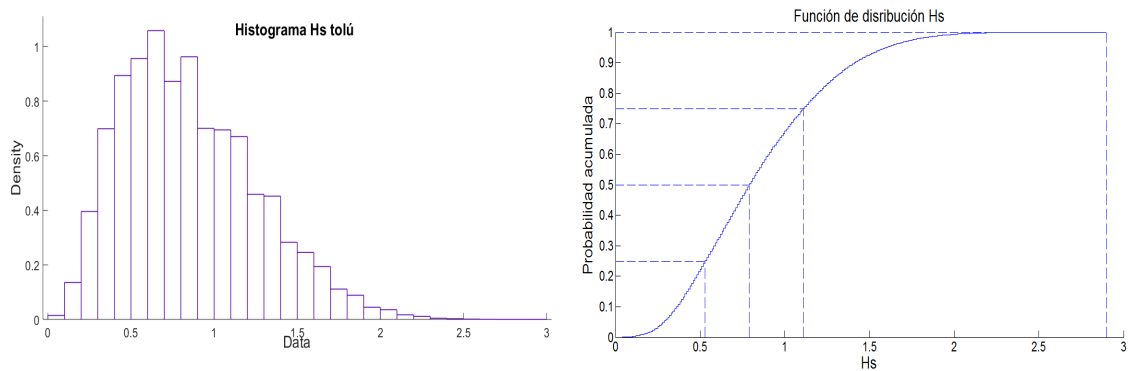


Figura 30: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Tolú

En la tabla 11 se puede observar que la dirección predominante es el NNE con un 74%, con alturas de 0,8 m y 1,9 m y una altura máxima de 2,9 m, sin embargo también se presenta una dirección importante al N con una probabilidad del 10,8% y una altura máxima de 2,7 m y una altura importante al NW de 2,8 m.

Tabla 11: Estadísticos básicos Hs Tolú

Dirección	Prob dirección	HS;50%	HS;90%	HS;99%	Hsmax
N	0,11	0,82	1,45	1,95	2,68
NNE	0,74	0,85	1,44	1,94	2,90
NE	0,00	0,38	0,55	0,64	0,64
ENE	0,00	0,28	0,42	0,49	0,49
E	0,00	0,33	0,55	0,59	0,59
ESE	0,00	0,30	0,49	0,66	0,66
SE	0,00	0,33	0,51	0,86	0,86
SSE	0,00	0,35	0,52	0,93	0,99
S	0,00	0,42	0,77	1,00	1,08
SSW	0,00	0,57	0,90	1,16	1,22
SW	0,02	0,56	0,88	1,25	1,60
WSW	0,03	0,47	0,82	1,39	1,82
W	0,00	0,43	0,79	1,38	1,88
WNW	0,01	0,41	0,86	1,48	2,19
NW	0,02	0,50	1,34	2,25	2,82
NNW	0,00	0,55	1,34	2,06	2,87

2.2.9. COVEÑAS-SUCRE

En la Figura 30, se pueden observar las series concerniente al registro histórico de las alturas significantes (H_s) y el periodo de pico (T_p) entre los años 1979 a 2017, en donde H_s tiene un rango desde 0,5m hasta 3m y el T_p tiene valores entre 2s y 18s respectivamente. En la figura también se muestra la rosa de oleaje y de periodos de pico, en la cual se evidencia que la dirección predominante del oleaje es NNE y las alturas de ola más probables están entre 0,5m y 2m y los periodos más probables están entre 6s y 10s.

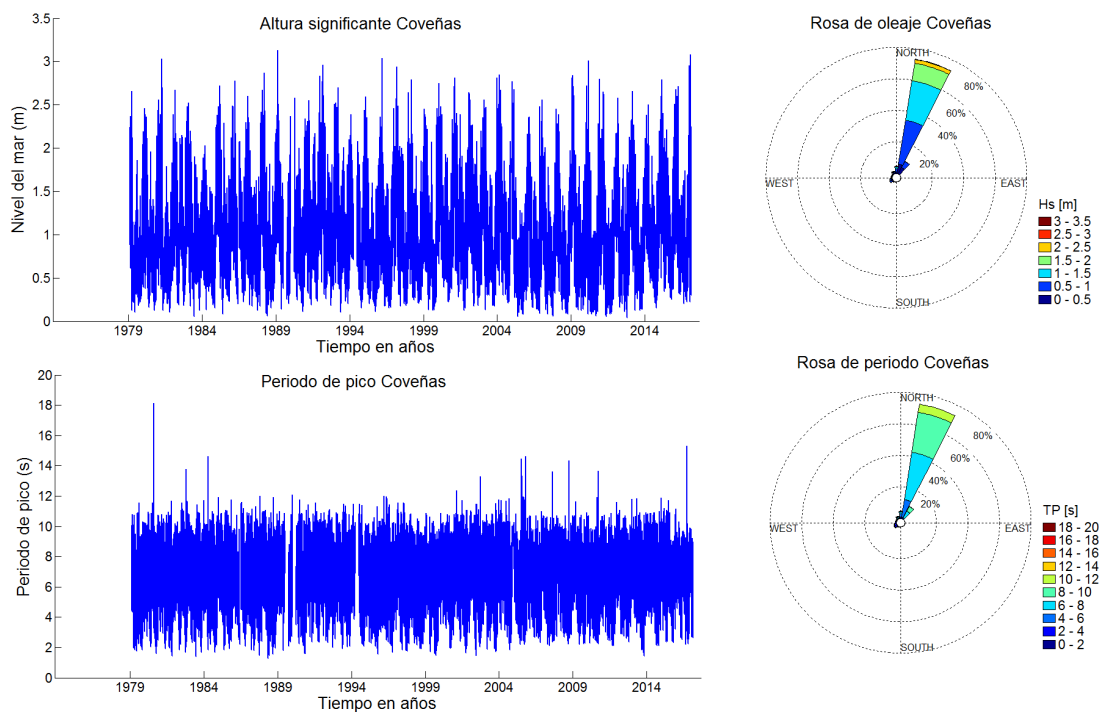


Figura 31: Registro histórico y rosa para altura y periodo de pico Coveñas

Se pueden observar en la Figura 31, que las alturas de ola más probables están en el rango de 0,5m a 1m y que el 50% del tiempo los oleajes en aguas profundas en Coveñas presentan alturas de ola menores o iguales a 0.7m.

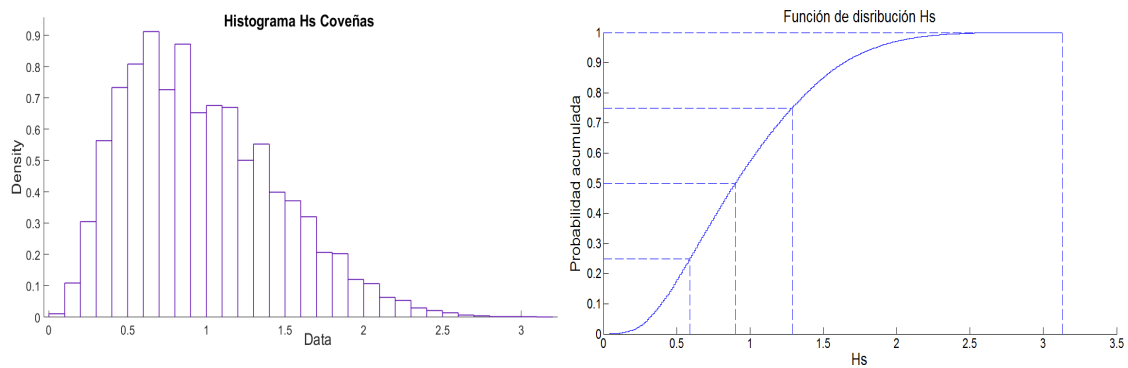


Figura 32: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Coveñas

En la tabla 12 se observa la probabilidad de obtener las diferentes direcciones y sus alturas correspondientes.

Tabla 12: Estadísticos Básicos para Hs Coveñas

Dirección	Prob dirección	HS;50%	HS;90%	HS;99%	HSmax
N	0,07	0,81	1,68	2,26	3,01
NNE	0,80	0,96	1,67	2,26	3,13
NE	0,00	0,30	0,52	0,66	0,66
ENE	0,00	0,28	0,51	0,52	0,52
E	0,00	0,32	0,52	0,61	0,61
ESE	0,00	0,30	0,52	0,71	0,71
SE	0,00	0,35	0,54	0,97	0,99
SSE	0,00	0,35	0,51	0,79	0,92
S	0,00	0,43	0,69	0,93	0,96
SSW	0,00	0,54	0,87	1,15	1,20
SW	0,02	0,55	0,88	1,29	1,59
WSW	0,02	0,49	0,89	1,38	1,76
W	0,00	0,47	0,81	1,38	1,78
WNW	0,01	0,43	0,92	1,50	2,44
NW	0,01	0,54	1,41	2,37	2,94
NNW	0,00	0,59	1,52	2,34	3,04

En la tabla 12 se puede observar que la dirección predominante es el NNE con un 80% de probabilidad con alturas de 0.9 m y 2.3 m y una altura máxima de 3.1 m, sin embargo también se presentan direcciones importantes al N con una

probabilidad del 6,9% y una altura máxima de 3 m y esporádicamente al NW con una probabilidad del 1.4% y altura máxima de 2.9 m.

2.2.10. TINAJONES- SUCRE

En la Figura 32 se pueden ver los datos concernientes al registro histórico de las alturas significantes (Hs) y el periodo de pico (Tp) entre los años 1979 al 2017, en donde podemos ver que Hs tiene un rango desde 0,3 m hasta 3,5 m y Tp tiene valores entre 2 s y 20 s respectivamente. En las rosas de oleaje y periodo podemos observar que las alturas predominantes están entre 0,5 m y 2,5 m y periodos de pico entre 2 s y 12 s en dirección NNE.

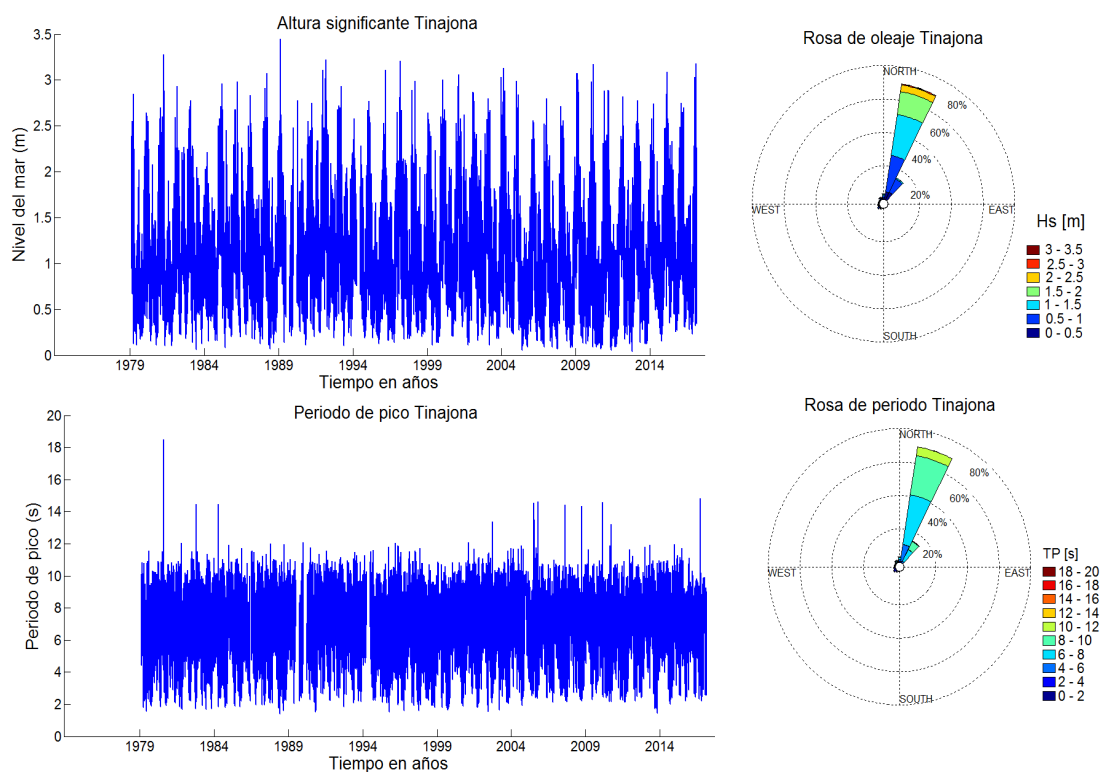


Figura 33: Registro histórico y rosa para altura significativa y periodo de pico Tinajones

En la Figura 33, perteneciente al histograma y a la frecuencia acumulada para alturas significantes se puede observar que las alturas predominantes están entre 0,7 m y 1 m y el 50% del tiempo posee alturas menores o iguales a 0,9 m.

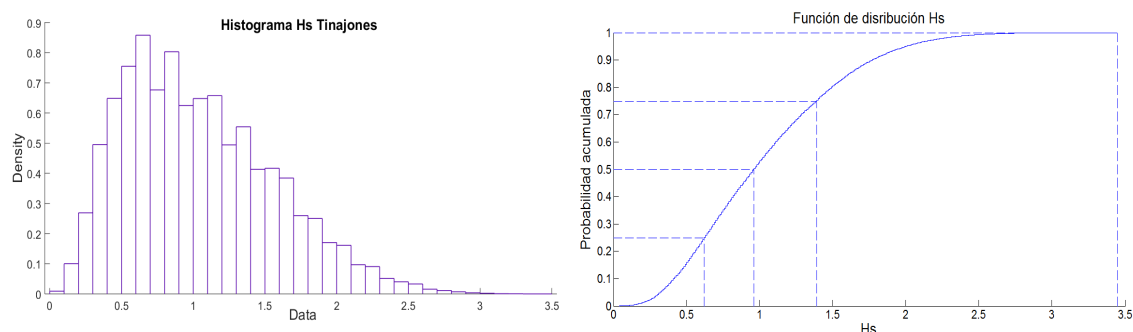


Figura 34: Histograma y frecuencia acumulada para Hs Tinajones

En la tabla 13 se puede observar que la dirección predominante es el NNE con un 83%, con alturas de 1m y 2,4 m y una altura máxima de 3,4 m, sin embargo también se presenta una dirección importante al N con una probabilidad del 4% y una altura máxima de 3,2 m y una altura importante al NNW de 3,1 m.

Tabla 13: Estadísticos básicos Hs Tinajones.

Dirección	Prob dirección	HS;50%	HS;90%	HS;99%	Hsmax
N	0,05	0,78	1,68	2,38	3,17
NNE	0,84	1,03	1,80	2,44	3,45
NE	0,00	0,22	0,46	0,62	0,62
ENE	0,00	0,29	0,49	0,53	0,53
E	0,00	0,29	0,47	0,57	0,57
ESE	0,00	0,31	0,49	0,89	0,89
SE	0,00	0,34	0,47	0,62	0,62
SSE	0,00	0,33	0,52	0,69	0,70
S	0,00	0,40	0,61	0,92	0,96
SSW	0,00	0,54	0,79	1,08	1,15
SW	0,02	0,54	0,88	1,27	1,66
WSW	0,02	0,51	0,90	1,35	1,75
W	0,00	0,48	0,80	1,31	1,66
WNW	0,01	0,46	0,92	1,41	1,76
NW	0,01	0,54	1,45	2,41	2,73
NNW	0,00	0,59	1,54	2,48	3,11

En general, en el sector de la plataforma continental del Caribe Colombiano se han presentado alturas significantes entre 0,3 m y 3,5 m aproximadamente y periodos de pico entre 2 y 18 segundos. La dirección predominante de las olas en el caribe colombiano es el NNE con una probabilidad del 84%. El 50% del

tiempo las alturas de las olas es menor o igual a 1 m aproximadamente y un periodo de pico de 7s.

La plataforma continental del Caribe Colombiano presenta un promedio de altura máxima de 3,3m en la dirección NW ya que el oleaje incide perpendicular a su línea de costa, sin embargo presenta alturas importantes de 3.9m aproximadamente, en la dirección NNE la cual es la predominante del oleaje.

En Puerto Velero y en Costa Verde se presenta los oleajes más energéticos ya que sus alturas máximas alcanzan rangos de 3,6m y 3,9m respectivamente en la dirección NNE.y NE.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente estudio se utilizaron perfiles batimétricos tomados por el grupo de investigación GEO4 de la Universidad del Norte, los levantamientos batimétricos se realizaron a una escala 1/200 y fueron tomados

con un transepto de cada 100 m y una resolución espacio al de cada 2m, a las siguientes playas de estudio y en las fechas mostradas:

Pájaro y Riohacha, perfil medido en diciembre del 2016; Costa Verde, perfil medido en noviembre del 2016; Puerto Velero, perfil medido en Octubre del 2015; Manzanillo, perfil medido en abril del 2011; Bocagrande, perfil medido en febrero del 2015; Punta de San Bernardo, Berrugas, Tolú, Coveñas y Tinajones, medido en enero del 2013.

Se realizó el análisis del clima marítimo utilizando el programa MATLAB, que es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, a las series de oleajes procesadas y calibradas bajo el proyecto de investigación “ Programa de investigación, desarrollo e innovación de la protección la zona costera en los departamentos de la Guajira y Magdalena”, la cual ya había sido previamente DIMAR en Bocas de Cenizas y Puerto Bolívar y calibradas con las mediciones realizadas por el grupo de investigación en Geociencias GEO4 de la Universidad del Norte frente a Bocas de Cenizas. Estas series de datos cubre el periodo comprendido entre febrero de 1979 a febrero del 2017, y corresponde a los estados de mar con una resolución de 3 horas.

La propagación del oleaje, desde aguas profundas hasta el pie de cada una de las playas objeto de estudio, se realizó mediante la utilización del modelo espectral SWAN (Simulation Waves Nearshore), que calcula los procesos de evolución de las olas, en aguas profundas, intermedias y someras. Esta propagación se efectuó sobre las mallas batimétricas, las cuales fueron obtenidas a través del grupo de investigación Geociencias - GEO4 de la Universidad del Norte, esta información fue facilitada en formato .grd.

La modelación en detalle se realizó con puntos de salida sobre la isobata de 20 m, la cual es una profundidad donde la dinámica del oleaje no se ve afectada por los cambios batimétricos de la zona. Estos puntos de salida están espaciados 5 metros, se tomó este espaciamiento debido a la resolución espacial que es de 1,5 Km aproximadamente. Las mallas batimétricas empleadas tienen un tamaño de celda entre 200 m y 400m, un tamaño de

mallas entre 21000 m y 60000 m en X, con un 21000 m y 66000 m en Y, y con un número de nodos entre 106 y 251 en X y 106 y 240 en Y (Ver tabla 14).

Luego de la propagación en SWAN se realizara las series de alturas significantes y la rosa de oleaje de cada una de las playas del Caribe Colombiano objeto de estudio en el pie de playa próximo a la zona, por medio del programa MATLAB, para las series comprendidas entre 1 de enero del 2006 al 18 de enero del 2017.

Se realizara el ajuste para cada perfil de equilibrio según las expresiones de Dean, Inman y Bernabeu, por medio de la herramienta en MATLAB cftool, esta aplicación proporciona una interfaz flexible donde puedes ajustar de forma interactiva curvas y superficies a los datos y ver gráficos, logrando con esto obtener cada uno de los coeficientes de forma para cada expresión y el punto límite de las concavidades que responde a los diferentes procesos de disipación de energía, los valores de la pendiente y el tamaño de sedimento.

Para el cálculo del número de Iribarren se utilizaran las series de oleaje completas de la base de datos del programa WAVE WATCH 3 en aguas profundas, mostradas en el capítulo 2 y para el cálculo del número de Iribarren en el pie de playa con la altura de la ola en rotura se utilizaron las series propagadas mediante la utilización del modelo SWAN. Con estos resultados se construirán los histogramas de frecuencia para el tipo de rotura en cada playa estudiada.

Según el valor del número de Iribarren se establecen cuatro tipos de rotura de olas:

Rotura tipo descrestamiento (D): la cresta de la ola se va haciendo cada vez más aguda, hasta hacerse inestable y se derrama hacia adelante por la pendiente frontal de la ola; generalmente se da en situaciones en donde el oleaje peraltado se propaga sobre playas con poca pendiente (Disipativas). En esta rotura el decaimiento de la altura es aproximadamente uniforme, con lo que hay gran disipación en la zona de rompientes y muy poca de su energía es reflejada hacia el mar. Este tipo de rotura se produce cuando $I_r < 0,5$ y $I_{rb} < 0,4$

Rotura tipo voluta (V): Se presentan en olas con poco peralte en playas relativamente inclinadas. La cara frontal de la ola se hace casi vertical, la cresta de la ola se hace más aguda, curvándose hacia el frente hasta que finalmente se precipita. El proceso de este tipo de rotura produce una gran turbulencia y una gran entrada de aire. La reducción de la altura de la ola durante la rotura se produce rápida y drásticamente. Las olas reformadas son usualmente de menos de una tercera parte de la altura de la ola en rotura y suelen romper de nuevo muy cerca de la orilla del mar. Es típico de playas intermedias disipativas, se produce en un rango de números de Iribarren, comprendido entre $0.46 < Ir < 2.5$, y $0.40 < Irb < 1.5$.

Rotura tipo colapso (C): El frente de la onda se aproxima a la vertical y la ola comienza a desmoronarse por su base y colapsa. El aire queda parcialmente atrapado, formando espuma. El periodo de ascenso-descenso coincide con el periodo del oleaje y el flujo sobre el talud alcanza valores máximos. La reflexión comienza a disminuir debido a la pérdida de energía por turbulencia. Es típico de playas intermedias reflejantes, se produce en un rango de números de Iribarren, comprendido entre $2.5 < Ir < 3.3$, y $1.5 < Irb < 2$.

Rotura tipo surging o no rotura (R): Ocurre en playas con pendientes muy pronunciadas (reflejantes). Este tipo de rotura comienza a desarrollarse de una forma similar a la rotura tipo voluta, donde su cara frontal se hace muy vertical, pero con la particularidad de que la base de la ola llega a la playa antes de que se lleve a cabo la rotura, por lo que la cresta se colapsa y desaparece. Con este tipo de rotura, generalmente la zona de rompiente es muy estrecha y aproximadamente la mitad del momentum de las olas es reflejado hacia el mar. Este tipo de rotura se produce cuando $Ir > 3.3$, o $Irb > 2$.

De igual forma se calculará el parámetro de la velocidad de caída de sedimento Ω , el cual según el modelo Wright y Short para playas micromareales por medio de la fórmula:

$$\Omega = H/wT$$

En donde H es la altura significativa de la ola en rotura media mensual correspondiente a los treinta días anteriores antes de la medición del perfil de playa, T es el periodo pico medio mensual antes de la medición del perfil de playa y w es la velocidad de caída del sedimento característico de la playa. Para H y T se tomó la medida dada por las series WW3 propagada, del mes anterior de la medición del perfil de cada una de las playas y w se halló por medio del D_{50} medido en las campañas de campo del grupo de investigación en Geociencias GEO4 y de la consulta de estudios realizados en las zonas estudiadas.

Por último se hará la clasificación morfológica y dinámica de las playas teniendo en cuenta los rangos de valores para cada uno de forma del perfil que más se ajuste a las playas del Caribe Colombiano, el número Iribarren y el parámetro adimensional de caída grano.

CAPITULO 4.

PROPAGACIÓN DEL OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS A LAS PLAYAS

En este capítulo se va a describir la metodología aplicada para la propagación del oleaje, desde aguas profunda hasta el pie de cada una de las playas objeto del presente estudio, mediante la utilización del modelo espectral SWAN.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO SWAN

Desarrollado en la Delft University of Technology (1996), el modelo *SWAN* simula numéricamente el oleaje en zonas costeras, lagos y estuarios, a partir de datos de viento, batimetría y condiciones iniciales, su nombre es el acrónimo en inglés de Simulating Waves Nearshore, que significa Simulación de Oleaje Costero.

El modelo cuenta con soporte físico capaz de realizar:

- Propagación espacial y temporal del oleaje, asomeramiento, refracción debido a corriente y profundidad, desplazamiento de frecuencias debido a corrientes y profundidad no estacionaria
- Generación de oleaje por viento
- Interacciones tres y cuatro olas
- Fenómeno de white - capping, fricción por el fondo y rotura por profundidad
- Disipación debido a vegetación acuática, flujo turbulento y fluido viscoso
- Set-up inducido por el oleaje
- Transmisión y reflexión (Especular y difusa) contra obstáculos
- Difracción.

En el modelo *SWAN* la evolución del espectro de oleaje es calculada por la ecuación espectral de balance de la acción (Hasselmann et al. 1973), con N (σ , θ), donde σ es la frecuencia y θ la dirección de propagación. Esta formulación toma implícitamente en consideración las interacciones entre las olas.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(C_x N)}{\partial X} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial Y} + \frac{\partial(C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

Siendo el primer término de la parte izquierda que muestra el cambio local en el tiempo de la densidad de acción, los dos siguientes términos representan la propagación de la acción en el espacio geográfico (con velocidades de propagación C_x y C_y respectivamente). El cuarto término, los cambios de la frecuencia relativa debido a las variaciones de la batimetría y las corrientes. El último término indica la refracción debida a la profundidad y las corrientes (con velocidad de propagación C_θ en el θ -espacio). El término S (σ , θ) es la fuente de energía de la ecuación y puede ser representado como la superposición de

diferentes términos fuente, cada uno de ellos indican un tipo de proceso diferente.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}(2)$$

S_{in} es el término debido a la transferencia de energía del viento a las olas, S_{ds} el debido al White - capping (descrestamiento), las interacciones de las olas con el fondo y en aguas muy someras la rotura de oleaje debido a la profundidad ;y S_{nl} representa las interacciones entre olas no lineales (tanto las interacciones entre cuádrupletas como las interacción estriádicas).

SWAN utiliza dos tipos de métodos para integrar numéricamente la ecuación de balance; el primero, es el método de diferencias finitas y el otro el método de elementos finitos. La elección de estos métodos de solución depende de la técnica de integración numérica utilizada para el término de propagación en el espacio geográfico.

El modelo integra numéricamente en coordenadas Cartesianas o curvilíneas (recomendadas para escalas pequeñas), o esféricas. El modelo SWAN funciona en opción estacionaria, útil cuando el tiempo de residencia del oleaje es corto en la malla de interés; esto significa que el tiempo de travesía del oleaje es pequeño respecto al del cambio de condiciones de frontera de oleaje, de viento o mareas, aunque también en modo no estacionario.

Las limitaciones del modelo SWAN es que no es capaz de calcular la difracción del oleaje, ya que no es un proceso conservativo, sin embargo, al calcular la distribución energética entre los puntos de la malla, los efectos de la difracción desaparecen, ya que las simulaciones se realizan en un amplio sector geográfico, No tiene en cuenta la reflexión (aunque pueden modelarse obstáculos), no calcula corrientes inducidas por el oleaje, pero sí pueden ser introducidas como entrada por lo cual puede determinar el efecto de la corriente en el oleaje, pero no lo contrario.

Para las modelaciones se empleó la configuración utilizada dentro del proyecto “Programa de Investigación, desarrollo e Innovación de la protección de las

zonas costeras en los departamentos de la Guajira y Magdalena” la cual ya había sido previamente calibrada con los datos de las boyas de oleaje de DIMAR en Bocas de Cenizas y Puerto Bolívar, y también calibrada con mediciones realizadas por el grupo de investigación en Geociencias GEO4 de la Universidad del Norte frente a Bocas de Cenizas.

4.2. DESCRICIÓN DE LAS MALLAS DE CÁLCULO

Las series de oleaje en aguas profundas se trasladaron al pie del perfil de cada una de las playas por medio del modelo SWAN, esta propagación se efectuó sobre las mallas batimétricas, las cuales fueron obtenidas a través del grupo de investigación Geociencias - GEO4 de la Universidad del Norte.

Las características de cada una de las mallas batimétricas empleadas se observan en la tabla 14:

Tabla 14: Características de las mallas batimétricas

Nombre de las mallas	Nodos		Tamaño celda (m)	Tamaño Malla	
	x	y		X (m)	Y (m)
Malla Guajira	251	240	200	50000	47800
Malla Ciénaga	140	161	200	32000	27800
Malla Puerto Velero	116	121	200	24000	23000
Malla Manzanillo	106	106	200	21000	21000
Malla Bocagrande	141	168	200	33400	31000
Malla Morrosquillo	133	121	500	60000	66000

De las figuras 34 a 39 se pueden observar los dominios computacionales de cada una de las zonas de estudio.

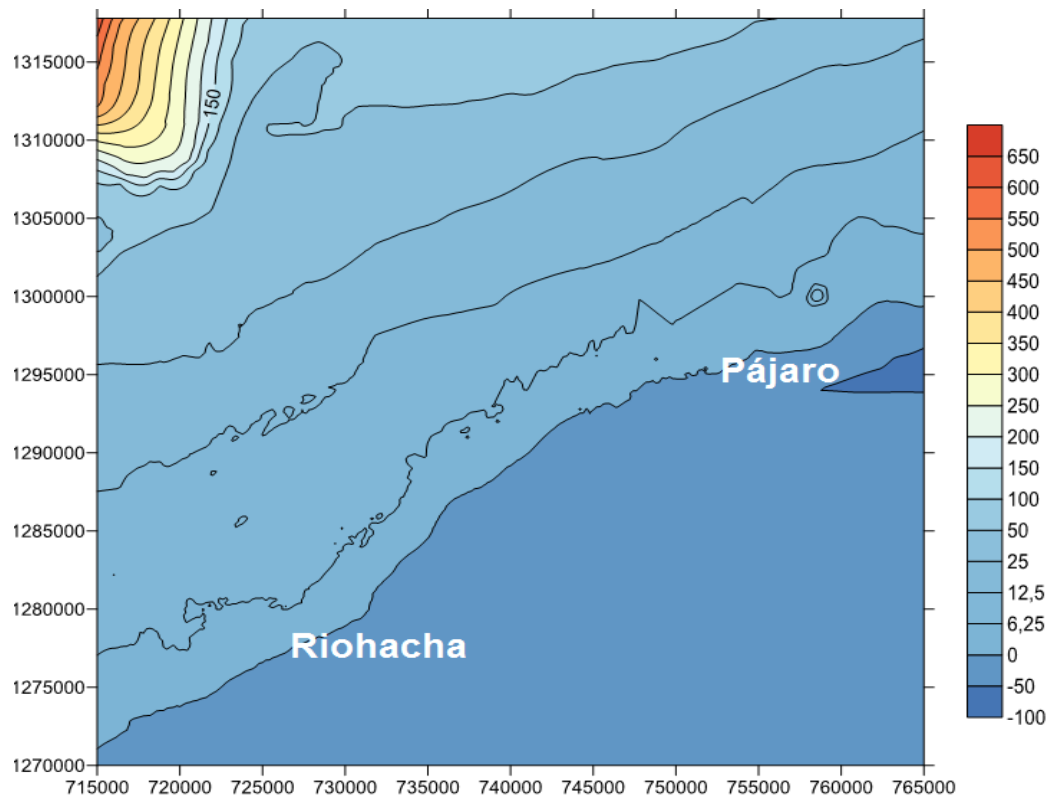


Figura 35: Batimetría de la zona Guajira, playas Pájaro y Riohacha

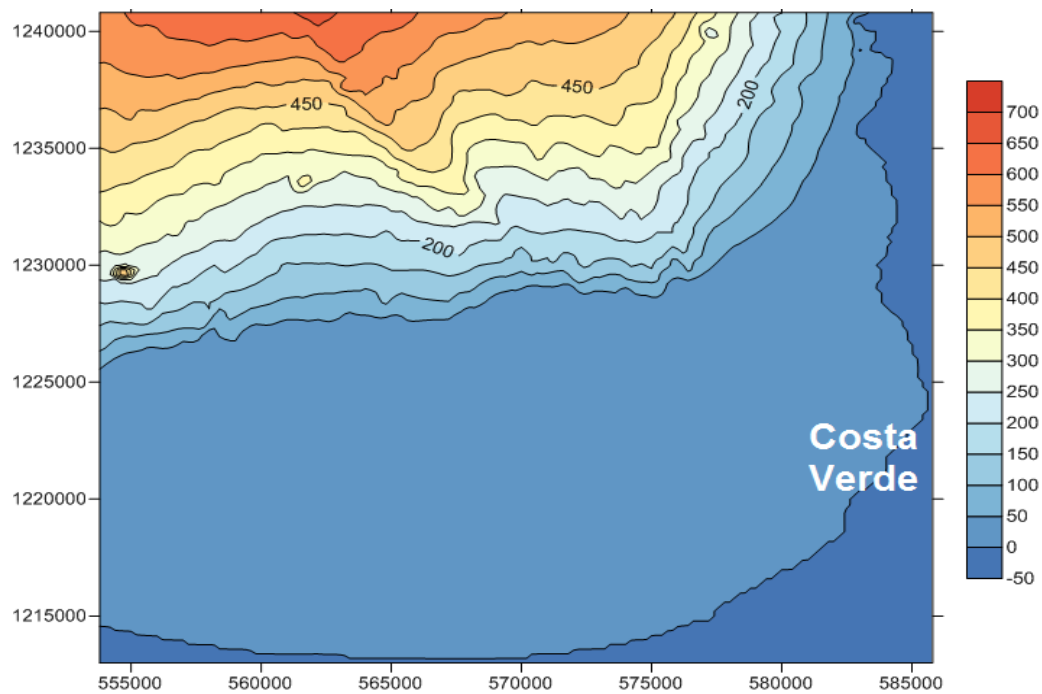


Figura 36: Batimetría de la playa Costa Verde

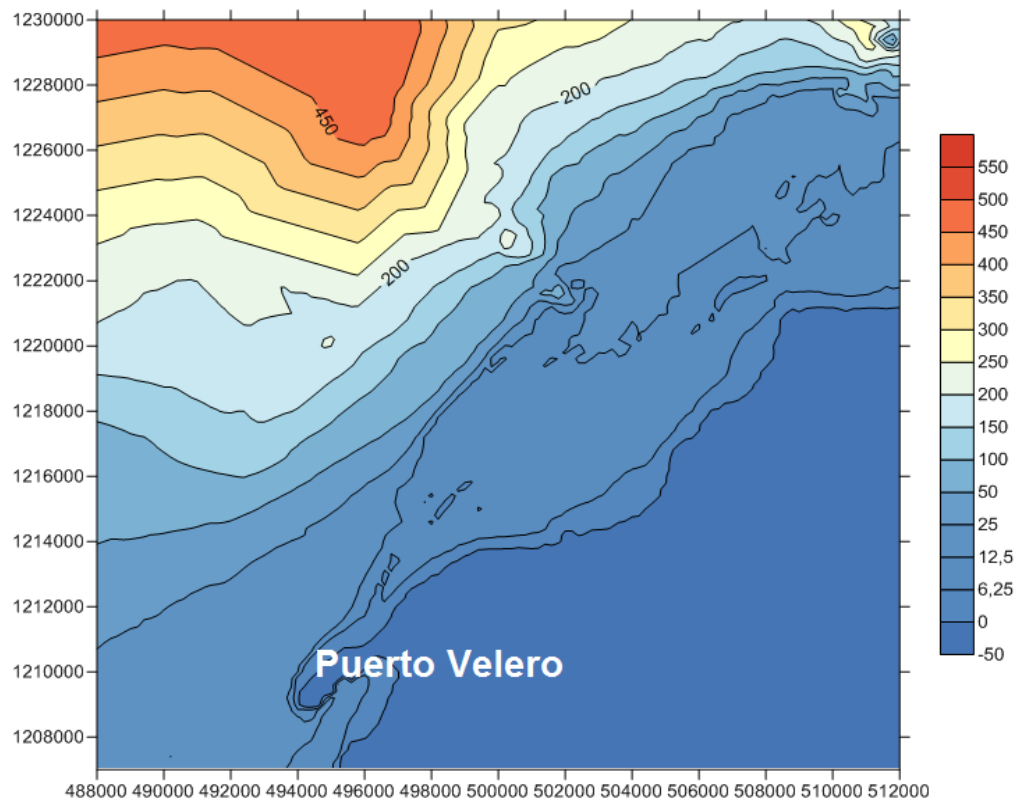


Figura 37: Batimetría de la playa Puerto Velero

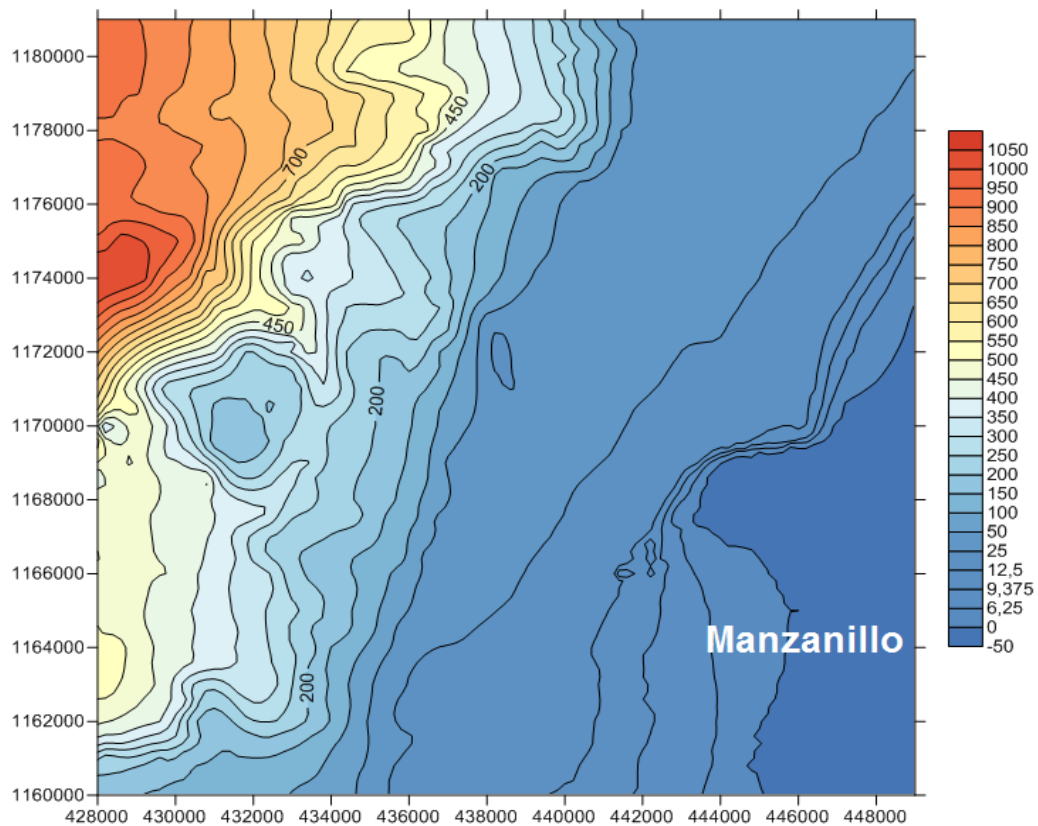


Figura 38: Batimetría de la playa Manzanillo

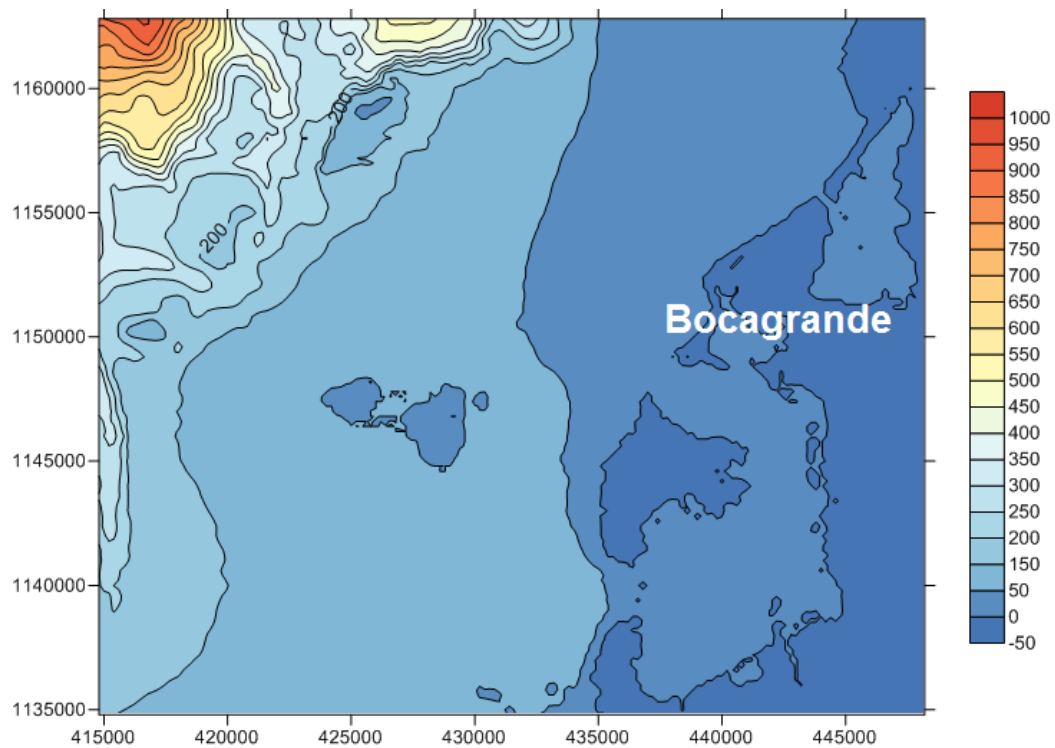


Figura 39: Batimetría de la playa Bocagrande

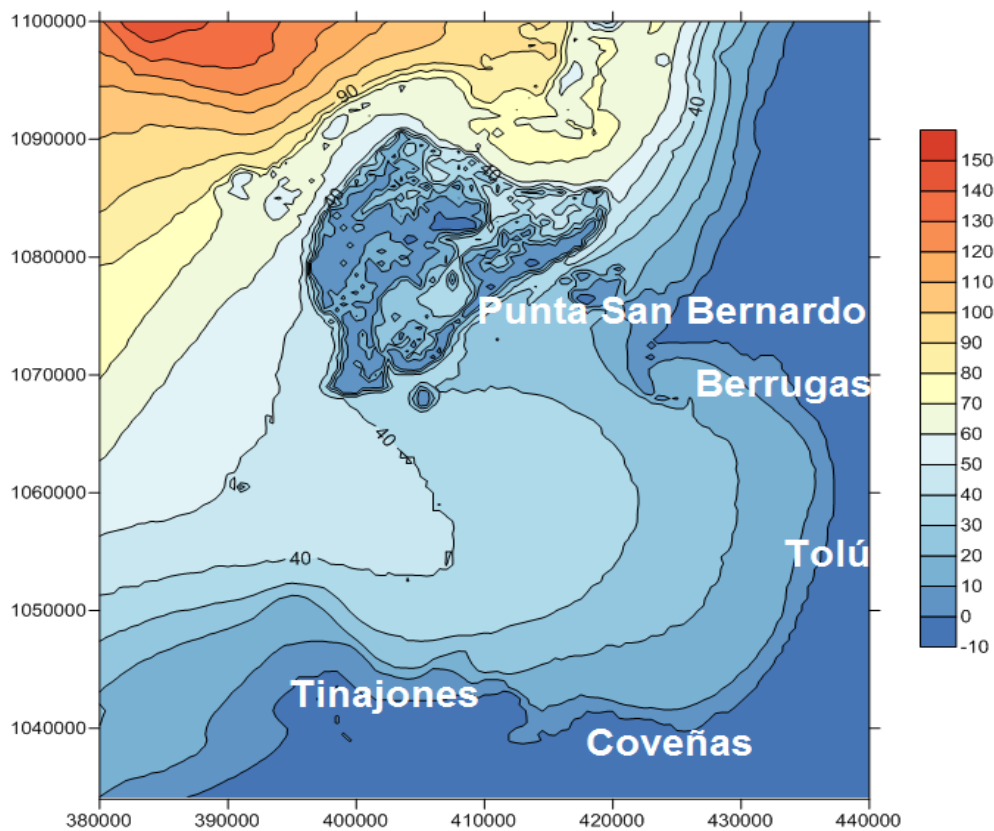


Figura 40: Batimetría de la zona Golfo de Morrosquillo, playas Punta San Bernardo, Berrugas, Tolú, Coveñas, Tinajones.

4.2. RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN

Se procedieron a propagar los resultados de las series descritas en el capítulo 2 para el Caribe Colombiano, las cuales se propagaron entre el periodo comprendido entre el 1 de enero del 2006 al 18 de enero del 2017, este periodo se considera suficientemente representativo para el objetivo final del trabajo y reduce los tiempos de cálculos computacionales del modelo.

A continuación se muestran, las series de altura significantes y la rosa del oleaje de cada una de las playas del caribe colombiano objeto de estudio en el pie de playa próxima a la zona de rotura.

4.2.1. PÁJARO

Se puede ver en la Figura 40, que después de la propagación las series de las alturas significantes (H_s) tienen un rango desde 0,3m hasta 2,5m y la rosa de oleaje muestra una transformación en la dirección del oleaje por procesos de refracción y difracción del NE y NNE en aguas profundas a la dirección N en el pie de playa, con alturas de ola entre 0,4m y 1,2m.

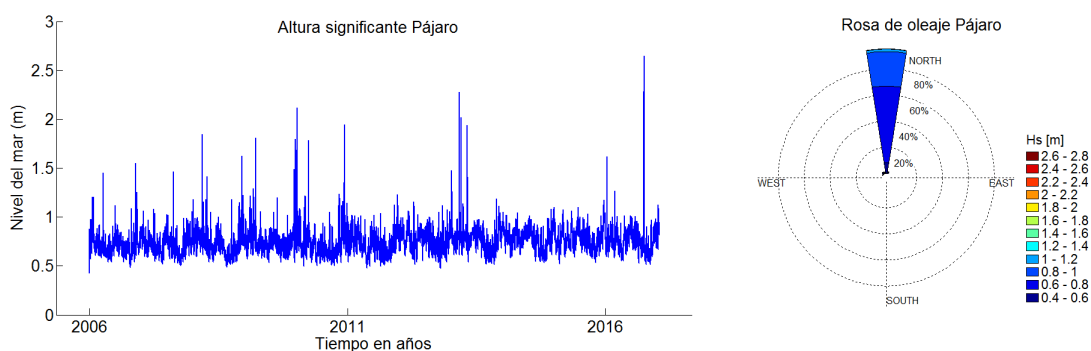


Figura 41: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa pájaro

4.2.2. RIOHACHA

Se puede ver en la Figura 41, que después de la propagación de las series de las alturas significantes (H_s) tienen un rango desde 0,4m hasta 2,2m y la rosa de oleaje muestra una transformación en la dirección del oleaje por procesos de refracción y difracción del NE y NNE en aguas profundas a la dirección N en el pie de playa con alturas de ola entre 0,5m y 1m.

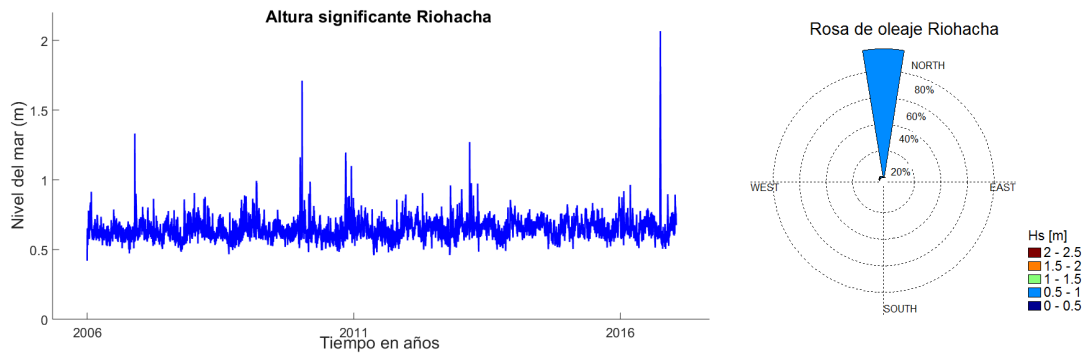


Figura 42: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Riohacha

4.2.3. COSTA VERDE

Se puede ver en la Figura 42, que después de la propagación de las series de las alturas significantes (H_s) tienen un rango desde 0,5m hasta 2,5m y la rosa de oleaje muestra una transformación en la dirección del oleaje por procesos de refracción y difracción del NE en aguas profundas a la dirección NO en el pie de playa con alturas de ola entre 0,5m y 1,5m.

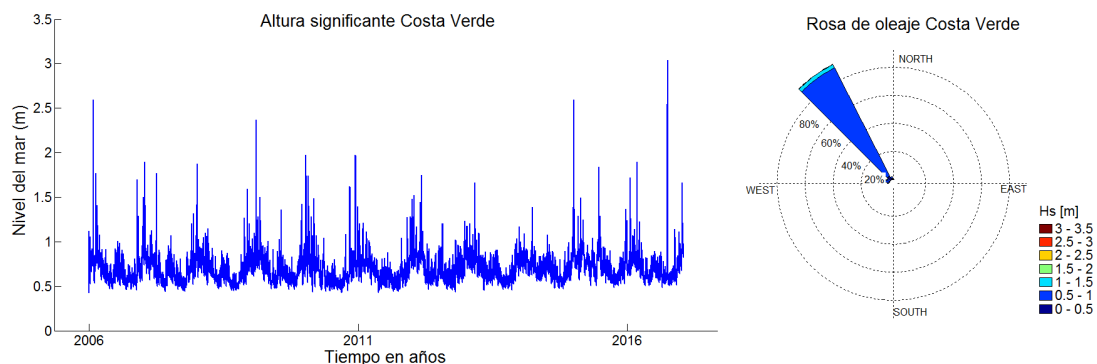


Figura 43: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Costa Verde

4.2.4. PUERTO VELERO

Se puede ver en la Figura 43, que después de la propagación de las series de las alturas significantes (H_s) tienen un rango desde 0,5m hasta 3,5m y la rosa de oleaje muestra una transformación en la dirección del oleaje por procesos de refracción y difracción del NE en aguas profundas a la dirección NNO en el pie de playa con alturas de ola entre 0,5m a 2m.

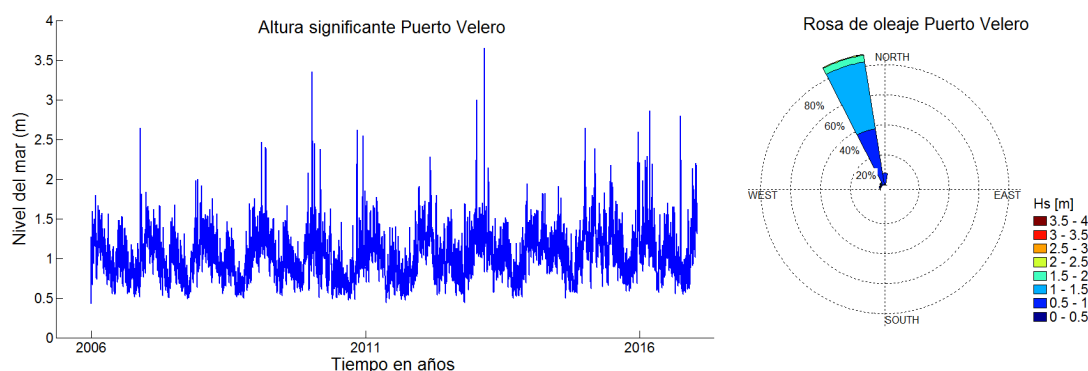


Figura 44: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Puerto Velero

4.2.5. MANZANILLO

Se puede ver en la Figura 44, que después de la propagación de las series de las alturas significantes (H_s) tienen un rango desde 0,5m hasta 2m y la rosa de oleaje muestra una transformación en la dirección del oleaje por procesos de refracción y difracción del NNE en aguas profundas a la dirección NO en el pie de playa con alturas de ola entre 0,5m a 1m.

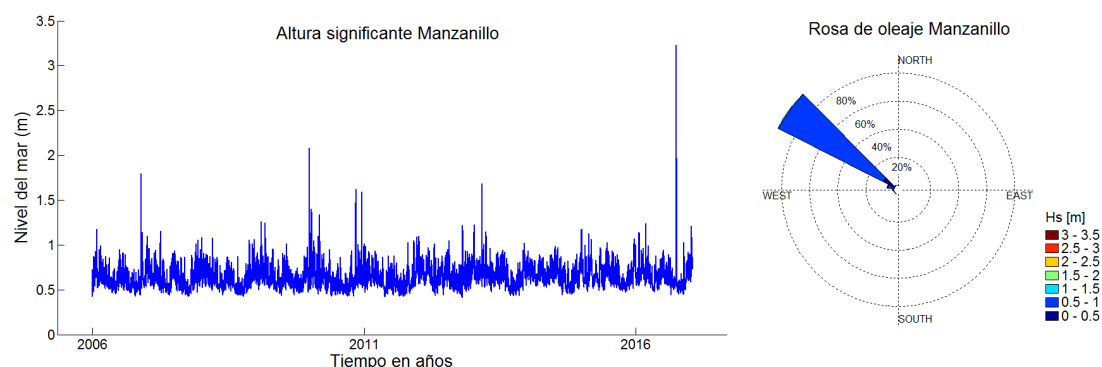


Figura 45: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Manzanillo

4.2.6. BOCAGRANDE

En la Figura 45 se observa las series de las alturas significantes (H_s) y la rosa del oleaje después de la propagación, la serie de H_s tienen un rango desde 0,5m hasta 2,5m y la rosa de oleaje muestra una transformación en la dirección del oleaje por procesos de refracción y difracción del NNE en aguas profundas a las direcciones NNO y NO en el pie de playa con alturas de ola entre 0,5m a 1,5m.

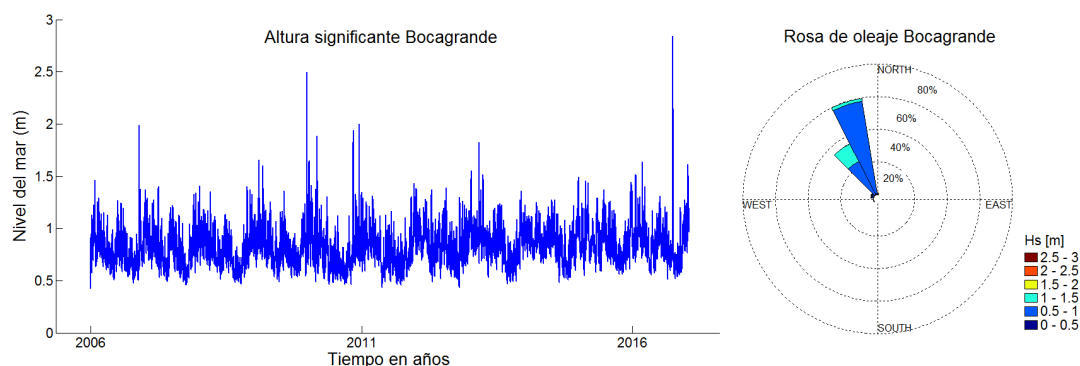


Figura 46: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Bocagrande

4.2.7. PUNTA SAN BERNARDO

En la Figura 46 se observa las series de las alturas significantes (H_s) y la rosa del oleaje después de la propagación, la serie de H_s tienen un rango desde 0,4m hasta 1,2m y la rosa de oleaje muestra una transformación en la dirección del oleaje por procesos de refracción y difracción del NNE y N en aguas profundas a las direcciones O y NO en el pie de playa con alturas de ola entre 0,5m a 1,5m.

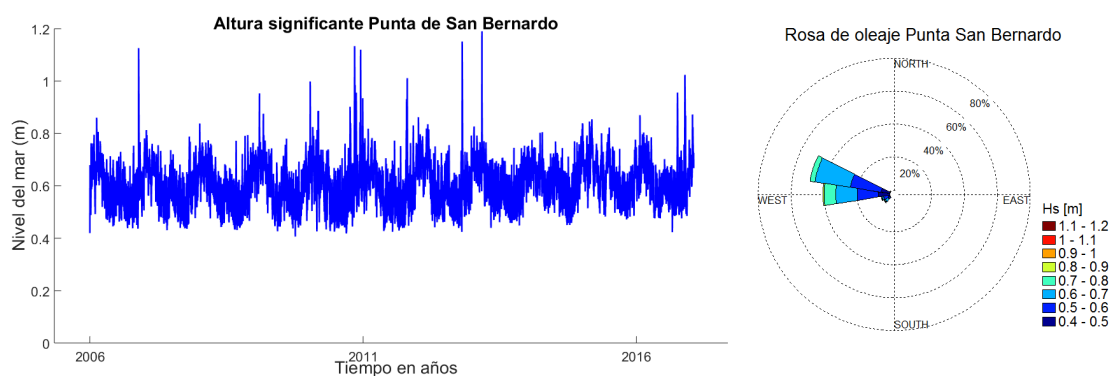


Figura 47: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Punta San Bernardo

4.2.8. BERRUGAS

En la Figura 47 se observa las series de las alturas significantes (H_s) y la rosa del oleaje después de la propagación, la serie de H_s tienen un rango desde 0,4m hasta 0,85m y la rosa de oleaje muestra una transformación en la

dirección del oleaje por procesos de refracción y difracción del NNE y N en aguas profundas a las direcciones O y SO en el pie de playa con alturas de ola entre 0,4m a 0,7m.

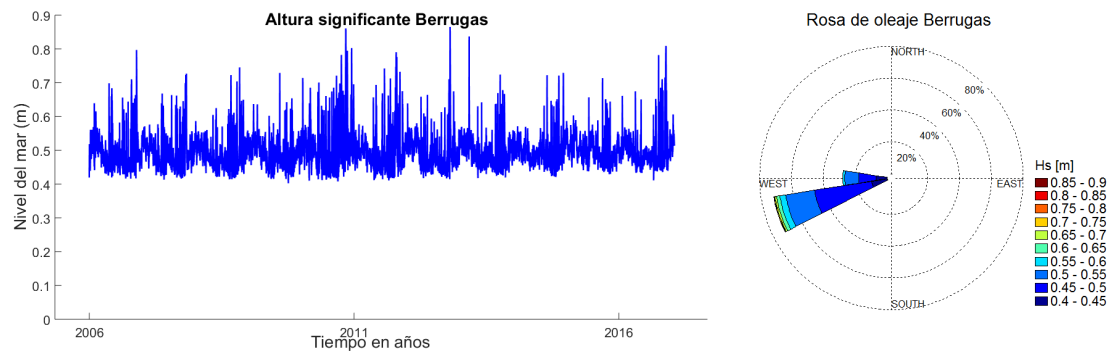


Figura 48: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Berrugas

4.2.9. TOLÚ

En la Figura 48 se observa las series de las alturas significantes (Hs) y la rosa del oleaje después de la propagación, la serie de HS tienen un rango desde 0,4m hasta 1,3m y la rosa de oleaje muestra una transformación en la dirección del oleaje por procesos de refracción y difracción del NNE en aguas profundas a la dirección NO en el pie de playa con alturas de ola entre 0,4m a 0,7m.

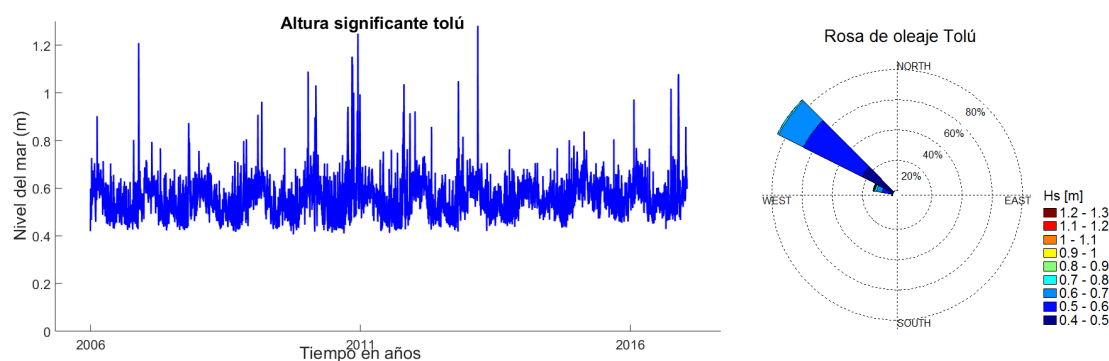


Figura 49: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Tolú

4.2.10. COVEÑAS

En la Figura 49 se observa las series de las alturas significantes (Hs) y la rosa del oleaje después de la propagación, la serie de HS tienen un rango desde

0,4m hasta 1,2m y la rosa de oleaje muestra una transformación en la dirección del oleaje por procesos de refracción y difracción del NNE en aguas profundas a la dirección NO en el pie de playa con alturas de ola entre 0,4m a 0,9m.

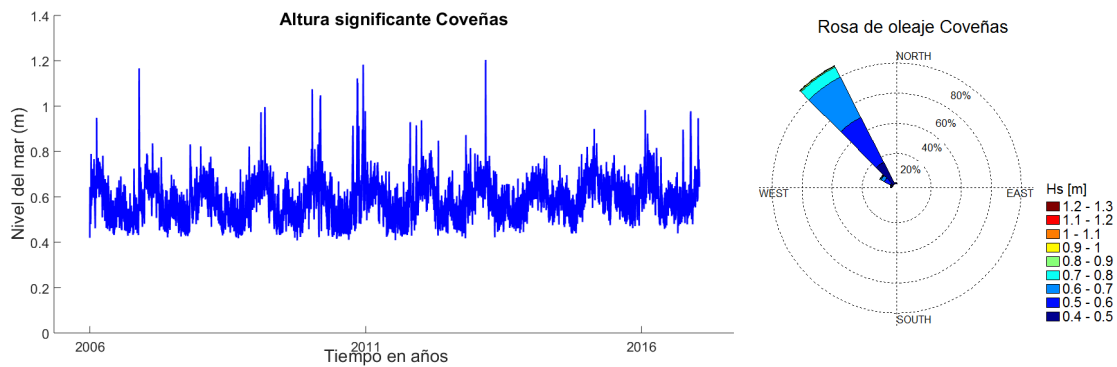


Figura 50: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Coveñas

4.2.11. TINAJONA

En la Figura 50 se observa las series de las alturas significantes (Hs) y la rosa del oleaje después de la propagación, la serie de HS tienen un rango desde 0,4m hasta 1,6m y la rosa de oleaje muestra una transformación en la dirección del oleaje por procesos de refracción y difracción del NNE en aguas profundas a las direcciones N y al NNO en el pie de playa con alturas de ola entre 0,4m a 1,2m.

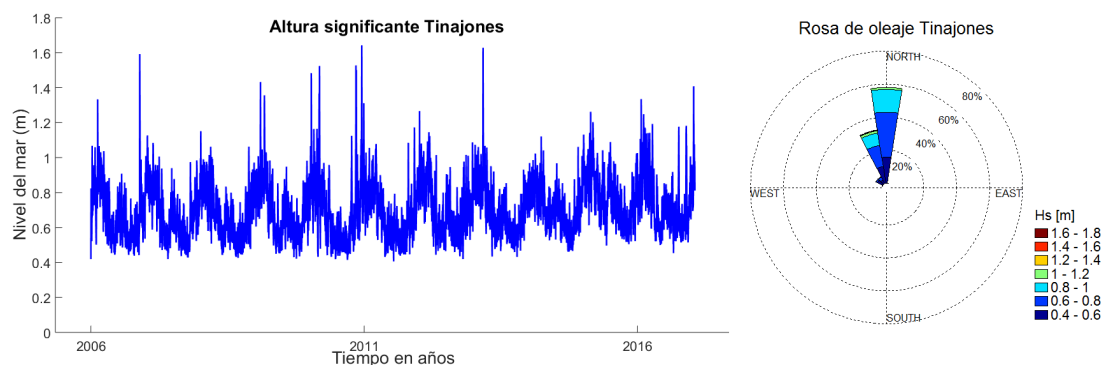


Figura 51: Altura significativa y rosa de oleaje al pie de playa para playa Tinajones

En general en las playas del Caribe Colombiano, cuando el oleaje se propaga desde aguas profundas hacia aguas someras en la costa, cambia su dirección predominante del cuadrante NE al cuadrante NO, debido a los procesos de refracción y difracción del frente de ola. Bajo estas circunstancias, el frente de ola se propaga al pie del perfil de la playa de forma paralela a la línea de costa, con un promedio de alturas entre 0,5m y 2,5m.

CAPITULO 5.

CONDICIONES DE EQUILIBRIO EN LAS PLAYAS DEL CARIBE COLOMBIANO

En este capítulo se describe en detalle las expresiones de equilibrio de playas y se efectúa el ajuste para cada perfil de equilibrio las expresiones de Dean, Inman y Bernabéu,

5.1. PERFIL AJUSTADO POR LA ECUACIÓN DE DEAN:

El modelo de perfil de equilibrio más utilizado es el conocido como perfil de Dean, por su simplicidad matemática. Dean (1977) ajustó mediante mínimos cuadrados 504 perfiles medidos a lo largo de la costa Atlántica de Estados Unidos a una expresión de la forma:

$$h(x) = Ax^n \quad (3)$$

Siendo $A = 0.51w^{0.44}$

Donde h es la profundidad respecto al nivel medio en reposo, x la distancia horizontal desde la línea de costa, A un parámetro adimensional de forma, dependiente de las características del sedimento, n parámetro de forma variable y w la velocidad de caída de grano.

Además, Dean (1977) encontró n es igual a $\frac{2}{3}$, el cual es consistente con una disipación uniforme de energía por unidad de volumen, D^* , considerando teoría lineal del oleaje y un modelo de rotura del oleaje donde la altura de ola,

H, en la zona de rompientes es proporcional a la profundidad del perfil, h, según la constante de proporcionalidad γ .

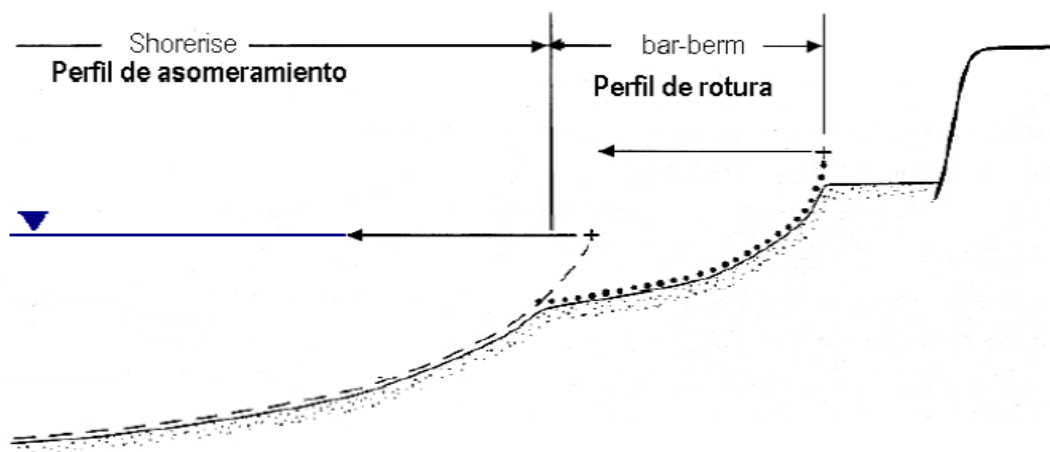
De este modo, el parámetro de escala, A, del perfil de equilibrio puede expresarse en términos de la disipación de energía D^* de la siguiente forma:

$$A = \left(\frac{24 D^*}{5 \rho g^{3/2} \gamma^2} \right)_{(4)}$$

Donde ρ es el peso específico del agua, g es la aceleración de la gravedad y γ la constante de proporcionalidad entre la altura de ola y la profundidad local en rotura.

5.2. PERFIL DE EQUILIBRIO AJUSTADO POR LA ECUACIÓN DE INMAN:

Inman et al. (1993) propusieron un perfil de equilibrio de dos tramos, cada uno de los cuales sigue una ecuación de la forma propuesta por Bruun (1954). De este modo distinguen la zona más próxima a la costa, en la que predominan las dinámicas propias del oleaje roto, de la zona más alejada, en la que el oleaje aún no ha roto. El tramo superior del perfil lo denominaron perfil de rotura (bar-berm), mientras que al tramo inferior perfil de asomeramiento (shorerise).



Fuente: Tomada de Inman (1993)

Figura 52: Modelo de perfil de equilibrio propuesto por Inman et al. (1993).

La ecuación del modelo de Inman es:

$$h - h_o = A(X - X_o)^b \quad (5)$$

Dónde:

X = Distancia medida desde el nivel medio del mar.

h = Profundidad del fondo en relación al nivel medio del mar.

b = Pendiente de playa

A= Coeficiente del modelo de Inman.

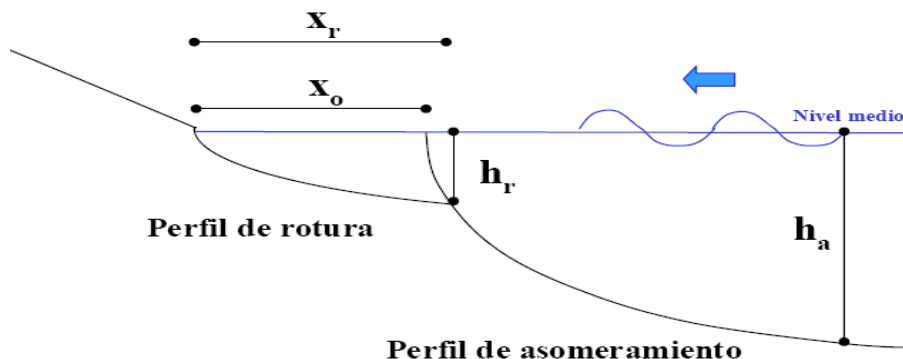
ho= La profundidad de la barra.

Xo= La distancia desde la línea del nivel del mar a la barra.

5.3. PERFIL DE EQUILIBRIO AJUSTADO POR LA ECUACIÓN DE BERNABEU:

Bernabéu Tello (1999) desarrolla un modelo para el perfil de playa, proponiendo la existencia de dos tramos diferenciados en el perfil, asociados a distintos procesos hidrodinámicos, básicamente rotura, que va desde la línea de costa al punto de rotura, y asomeramiento, que va desde el punto de rotura hacia aguas adentro. Dichos procesos generan la disipación de la energía del oleaje incidente sobre el perfil por turbulencia, generada por las olas rotas, y por fricción con el fondo, generado por la propagación de ondas en profundidades reducidas, respectivamente.

La intersección entre ambos tramos coincide con el punto de rotura, ya que dicho punto marca la separación entre la acción del asomeramiento y la rotura sobre el perfil. La localización del punto de inflexión está definida por X_r que es la distancia horizontal entre el inicio del perfil de rotura y el punto de separación y h_r profundidad localizada en dicho punto. (Ver Figura 52).



Fuente: Tomada de Bernabeu (1999)

Figura 53: Perfil de equilibrio en dos tramos propuesto por Bernabeu en 1999

El modelo de perfil de equilibrio propuesto por Bernabéu et al. (2001) parte de la ecuación del balance energético a lo largo del perfil. En este modelo se asume que la energía incidente del oleaje sobre una playa se atenúa exclusivamente por disipación y otra parte se refleja, devolviendo parte de esa energía a aguas profundas.

Por tanto, consideramos como flujo total en una sección del perfil a la suma del flujo incidente y el flujo reflejado

$$\frac{dF_t}{dx} = \frac{dF_i}{dx} - \frac{dF_R}{dx} = \varepsilon \quad (6)$$

Donde F_i es el flujo de energía incidente, en dirección hacia la costa, y F_R es el flujo de energía reflejada (en dirección hacia el mar) que atraviesan una determinada sección del perfil, ε es la disipación por unidad de área y dx es el incremento de distancia a la costa.

Dentro de la zona de rompientes, el fenómeno principal de disipación de energía es la turbulencia asociada a la rompiente (Thorton y Guza, 1983). Por tanto en este tramo del perfil, viene definida como:

$$\frac{1}{h} \left[\frac{dF_i}{dx} - \frac{dF_R}{dx} \right] = \frac{\varepsilon_r}{h} = D^* = cte \quad (7)$$

Donde D^* es la disipación de energía incidente debida a la turbulencia por unidad de volumen, F_R es el flujo de energía reflejado y F_i viene definido según la teoría lineal de ondas como: $F = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{g h}$

Integramos la ecuación de balance energético (6), obtenemos:

$$x = \left(\frac{h}{A} \right)^{3/2} + \frac{B}{A^{3/2}} h^3 \quad (8) \text{ Expresión de Bernabéu para el perfil de rotura}$$

Cada término de la expresión (8) viene caracterizado por dos coeficientes: el coeficiente dimensional A ($m^{\frac{1}{3}}$) que depende de la disipación por unidad de

volumen que se genera a lo largo del perfil y el coeficiente dimensional B ($m^{-\frac{10}{3}}$) asociado a la reflexión.

Fuera de la zona de rompientes, se asume que la disipación por unidad de área debida a la fricción con el fondo es constante (Bruun, 1954). Por lo que la expresión para disipación de energía está dada por:

$$\left[\frac{dF_I}{dx} - \frac{dF_R}{dx} \right] = \varepsilon_r = D^* = cte \quad (9)$$

Donde D^* es la disipación de energía incidente, debida a la fricción con el fondo, por unidad de área. Integrando la expresión (6), llegamos a la formulación:

$$X = x - x_o = \left(\frac{h}{c} \right)^{3/2} + \frac{D}{c^{3/2}} h^3 \quad (10) \text{ Expresión de Bernabéu para el perfil de asomeramiento}$$

El coeficiente dimensional C ($m^{1/3}$) está relacionado con el fenómeno de disipación. Al introducir el fenómeno de reflexión, en el perfil de asomeramiento definimos el coeficiente dimensional D ($m^{-\frac{8}{3}}$).

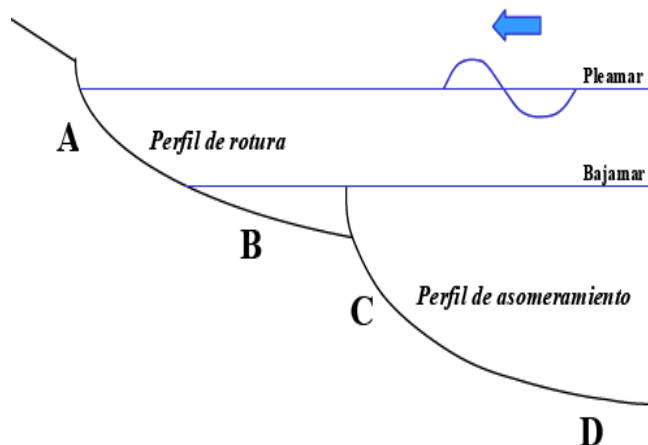
Bernabéu analizó la forma del perfil en playas españolas, determinando que los coeficientes A, B, C y D dependían principalmente del parámetro adimensional de la velocidad de caída de grano Ω . Los valores de estos coeficientes para el perfil de la playa hallados por Bernabéu y su ubicación se muestran en la Figura 53:

$$A = (0.21 - 0.02\Omega_{sf})$$

$$B = 0.89 \exp[-1.24\Omega_{sf}]$$

$$C = (0.06 + 0.04\Omega_{sf})$$

$$D = 0.22 \exp[-0.83\Omega_{sf}]$$



Fuente: Tomada de Bernabeu (1999) y modificada por el autor

Figura 54: Coeficientes de la forma del perfil de playa hallados por Bernabéu 2001

Mientras el coeficiente asociado a la disipación (A en el perfil de rotura, C en el de asomeramiento) determinan la pendiente del perfil en zona cercana al frente de playa o al punto de inflexión, respectivamente; el coeficiente asociado a la reflexión (B y D) marca la pendiente de la zona más profunda de cada tramo (figura 53). El perfil con reflexión define la morfología de cada tramo articulado en dos secciones con pendiente distinta, que permiten definir distintos grados de concavidad del mismo. Los coeficientes asociados a la disipación (A y C) presentan una relación directa con la pendiente: a mayor valor del coeficiente, mayor pendiente del sector inicial de cada tramo; los coeficientes asociados a la reflexión (B y D) mantienen una relación inversa: cuanto mayor es el coeficiente más tendida es la parte profunda de cada tramo y, consecuentemente, mayor la concavidad.

5.4. AJUSTE DE LOS PERFILES DE PLAYA POR MEDIO DE LAS EXPRESIONES DE DEAN, INMAN Y BERNABEU

A continuación se presentan los resultados del ajuste del perfil de playa utilizando las expresiones de Dean, Inman y Bernabéu.

5.4.1. AJUSTE DEL PERFIL DE DEAN:

De la Figura 54 a la 64 se muestra el ajuste para cada una de las playas del caribe colombiano utilizando el perfil de Dean, uno de los más utilizados por su simplicidad matemática. La fórmula a utilizar es:

$$h(x) = Ax^{2/3}$$

En la tabla 15 se presentan los valores obtenidos para el parámetro A y la bondad de ajuste.

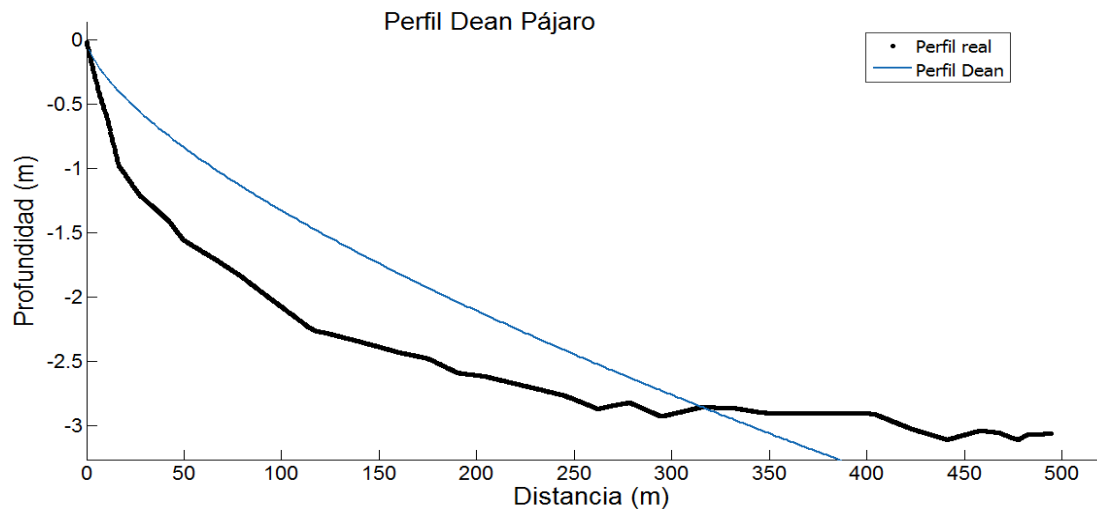


Figura 55: Ajuste Perfil Dean a la playa de Pájaro.

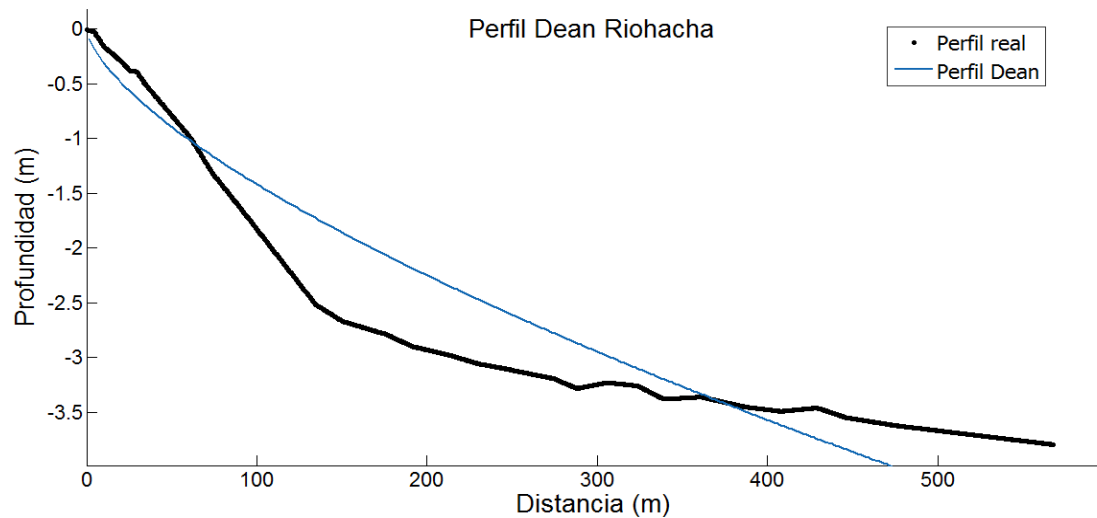


Figura 56: Ajuste perfil Dean a la playa de Riohacha

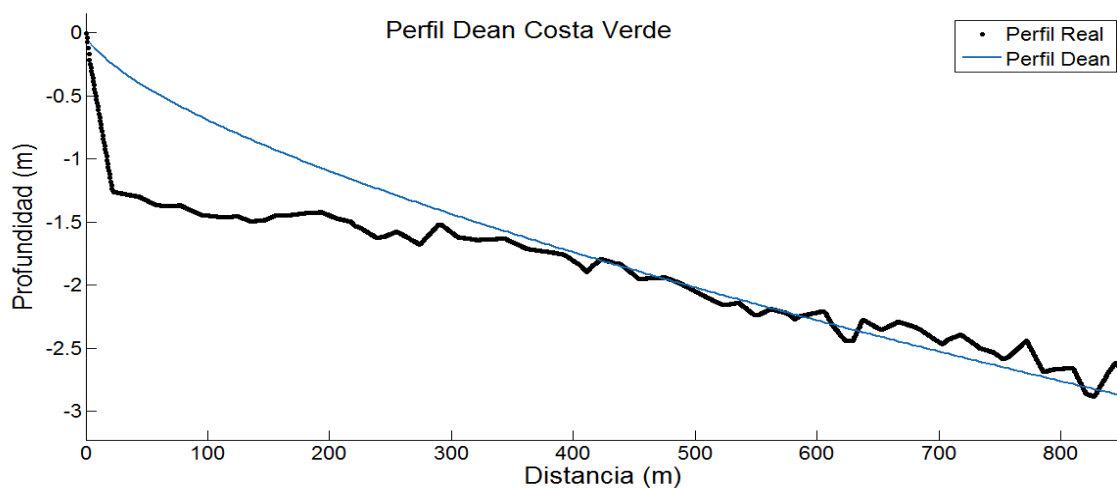


Figura 57: Ajuste perfil Dean a la playa de Costa verde

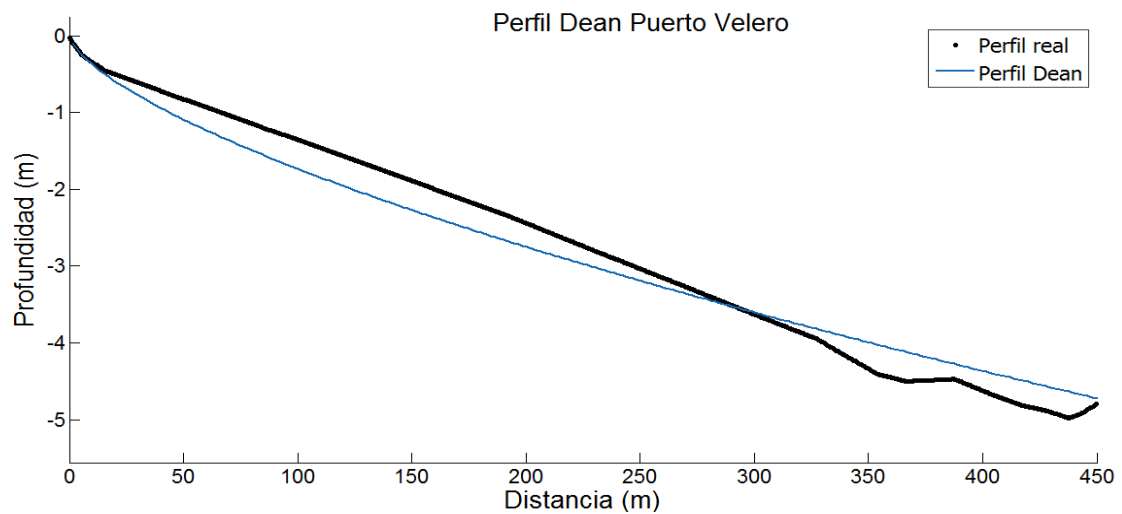


Figura 58: Ajuste perfil Dean a la playa de Puerto Velero

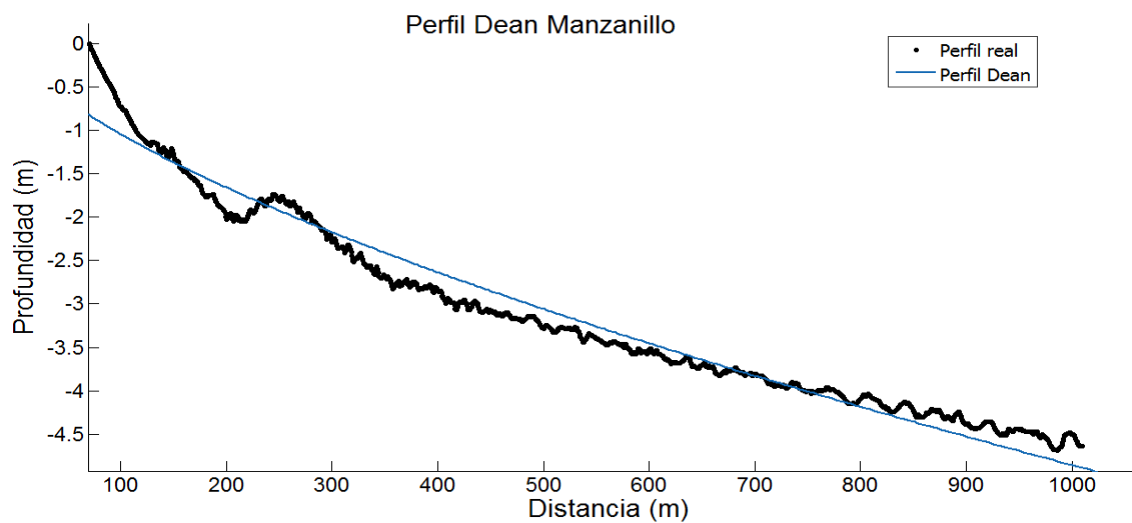


Figura 59: Ajuste perfil Dean a la playa de Manzanillo

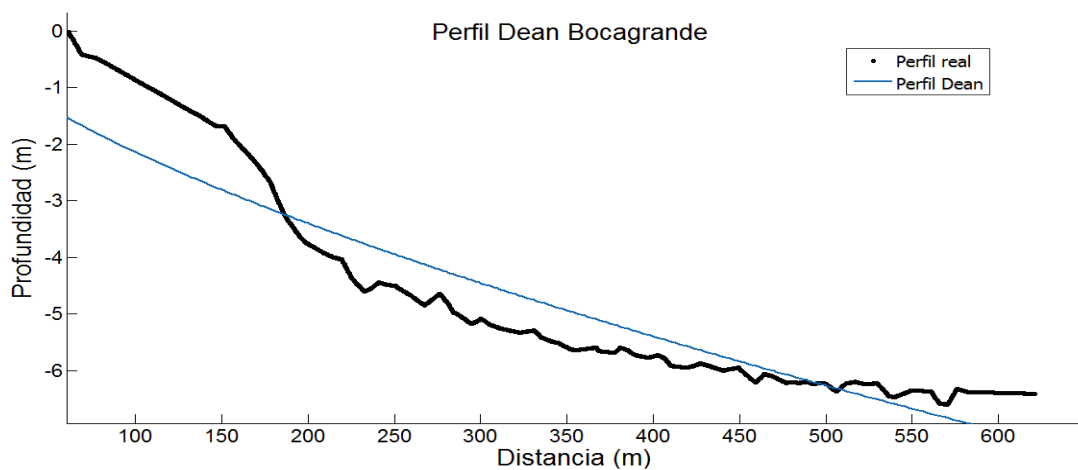


Figura 60: Ajuste Perfil Dean a la playa de Bocagrande.

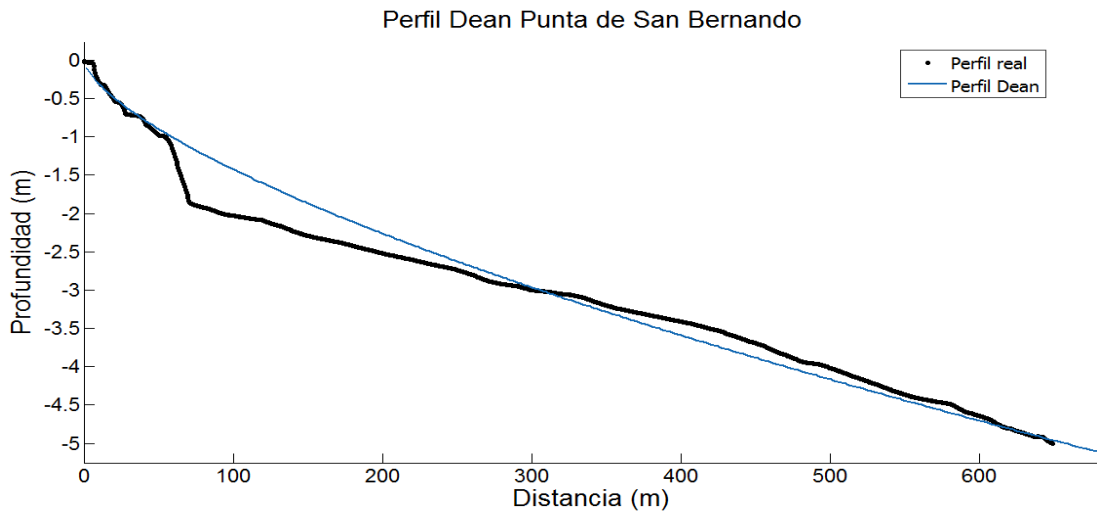


Figura 61: Ajuste Perfil Dean a la playa de Punta San Bernardo

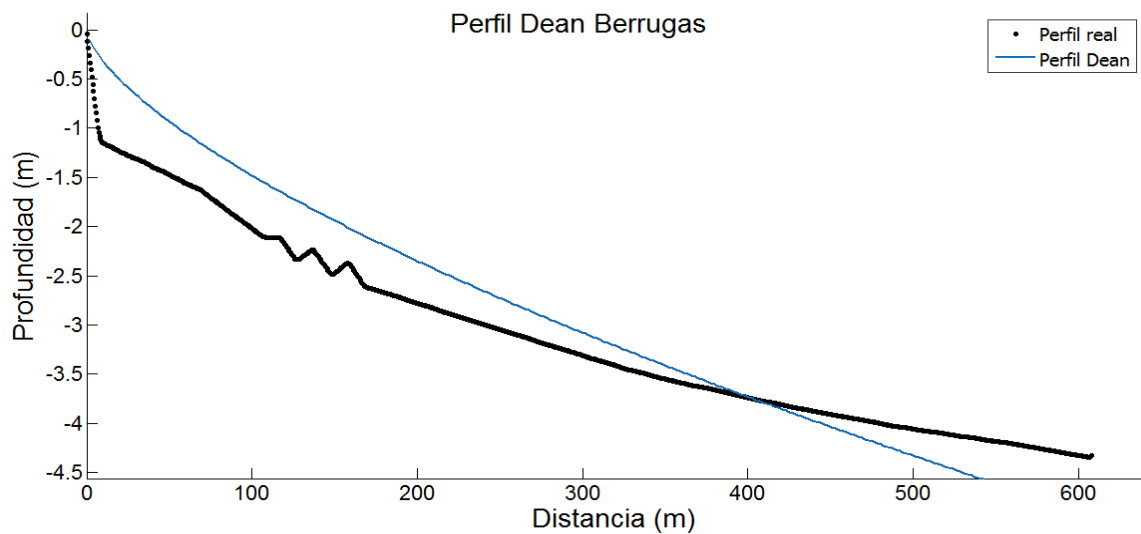


Figura 62: Ajuste perfil Dean a la playa de Berrugas

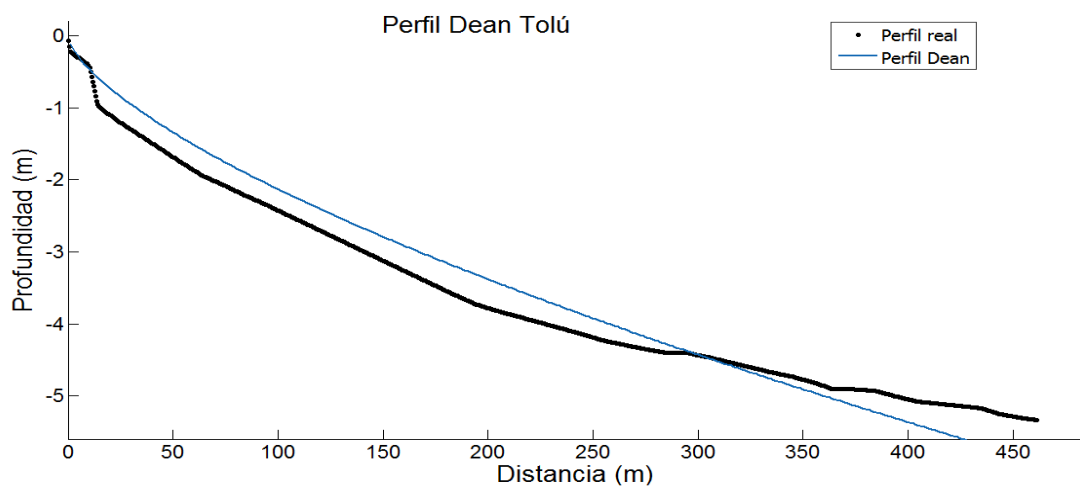


Figura 63: Ajuste de Perfil Dean a la playa de Tolú

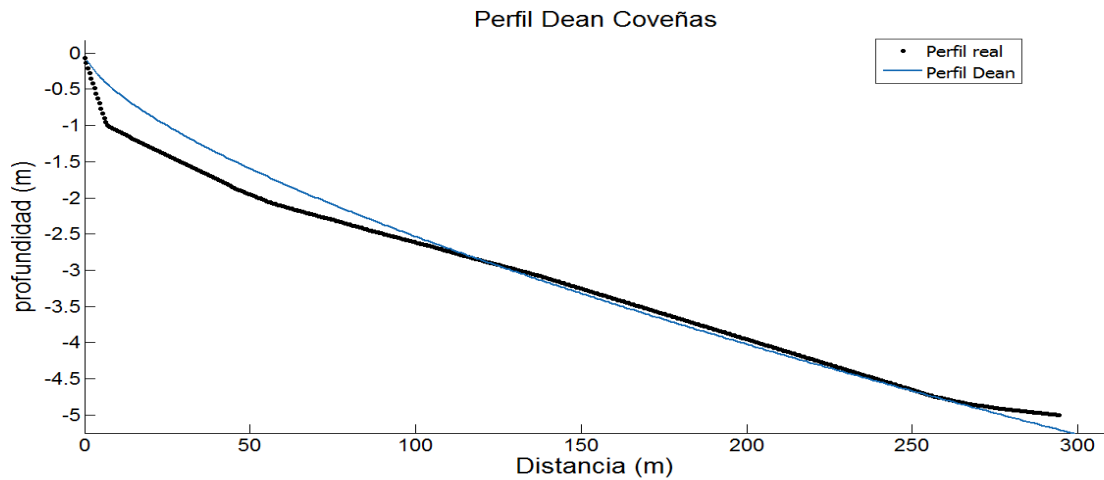


Figura 64: Ajuste de Perfil Dean a la playa de Coveñas

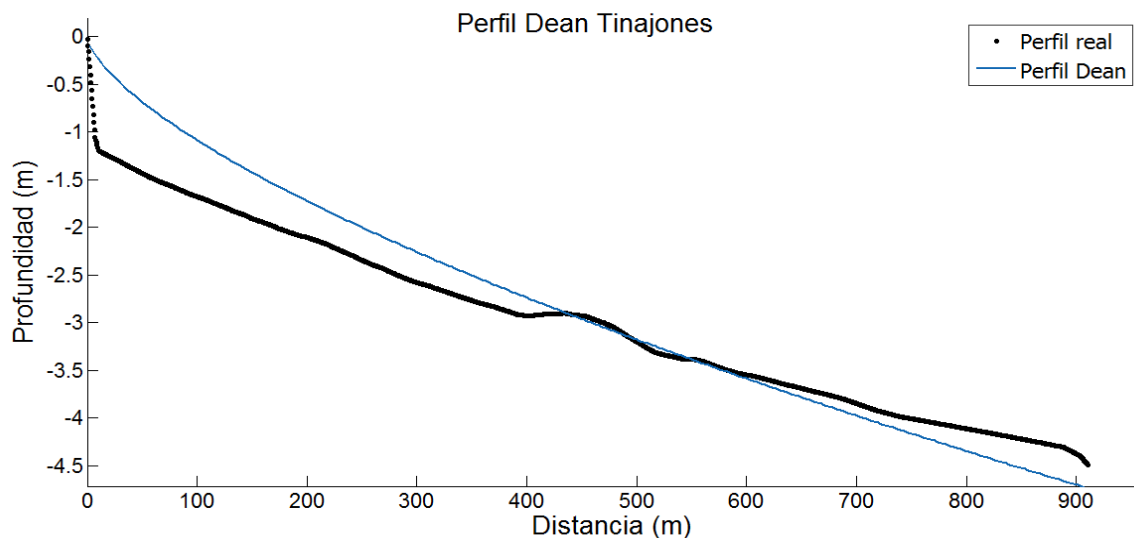


Figura 65: Ajuste de Perfil Dean a la playa de Tinajones

Como podemos observar en cada una de las figuras anteriores y en la tabla 15, los valores de la constante A para la forma del perfil de Dean, esta entre 0.03134 y 0.1176, que están acordes con los datos en la literatura en donde está definido en un rango de $0 < A < 0.3$ (Dean, 1977).

Por medio de la formulación de Dean se logró calcular la velocidad de sedimento por medio de la formula $A = 0.51w^{0.44}$ y el D_{50} por medio de la formula $w_s = 273D_{50}^{1.1}$ (Toledano y Silva, 2005), clasificando el tipo de sedimento perteneciente a cada una de las playas, tomando como base para esta clasificación el trabajo de Arias D et al (2012). Se puede observar que para Riohacha y Pájaro el tipo de sedimento es Arena Fina- Media

correspondiente a lo identificado por Paramo J et al (2013). En Costa Verde muestra arena fina, de acuerdo con lo establecido por INVEMAR (2012). Berrugas, Coveñas, Tinajones, Tolú, Punta de San Bernardo, corresponden arena fina a gruesa, cumpliendo en su mayoría con lo establecido por INVEMAR (2012). Bocagrande y Manzanillo, registran arena media y fina respectivamente acorde con Arias D et al (2013). Puerto Velero, registra tamaño de sedimento medio, no muy acorde con Dimar – CIOH (2013).

Además, se puede observar que para las playas del Caribe Colombiano ajusta bien el perfil de Dean. En Coveñas el porcentaje de ajuste es del 97% seguido Manzanillo con un 96%, pero no todas las playas tienen un buen porcentaje de ajuste, ya que playas como Pájaro tiene un ajuste de bondad del 33%, a pesar de que existe muy poca concordancia en algunos de los perfiles. Es una buena herramienta para la caracterización y estudio de una playa.

Tabla 15: Valores de A para el Perfil de Dean playas del Caribe Colombiano

Playas	A	Ajuste de Bondad	W (m/s)	D50 mm	CLASE DE SEDIMENTO SEGÚN DEAN
Berrugas	0,06872	82%	0,01051	0,405	ARENA MEDIA
Bocagrande	0,09937	87%	0,0243	0,7659	ARENA MEDIA GRUESA
Ciénaga	0,03134	71%	0,00176	0,102	ARENA FINA
Coveñas	0,1176	97%	0,03563	1.036	ARENA GRUESA
Manzanillo	0,04854	96%	0,00476	0,22	ARENA FINA
Pájaro	0,06163	33%	0,0082	0,335	ARENA MEDIA-FINA
Puerto Velero	0,08041	97%	0,01502	0,533	ARENA MEDIA GRUESA
Punta de San Bernardo	0,06611	95%	0,0096	0,378	ARENA MEDIA - FINA
Riohacha	0,06577	80%	0,0095	0,375	ARENA MEDIA - FINA
Tinajona	0,04768	83%	0,00458	0,214	ARENA FINA
Tolú	0,09885	94%	0,02401	0,765	ARENA MEDIA GRUESA

5.4.2. AJUSTE DE PERFIL DE INMAN:

De la Figura 65 a la 75 se muestra el ajuste para cada una de las playas del caribe colombiano utilizando el perfil de Inman y los resultados para el

coeficiente A asociado a la morfología del perfil. La fórmula a utilizar para el ajuste es:

$$h = A(X - X_o)^b$$

En la tabla 16 se muestra la pendiente m de la playa fue obtenida directamente del perfil medido, para cada tramo.

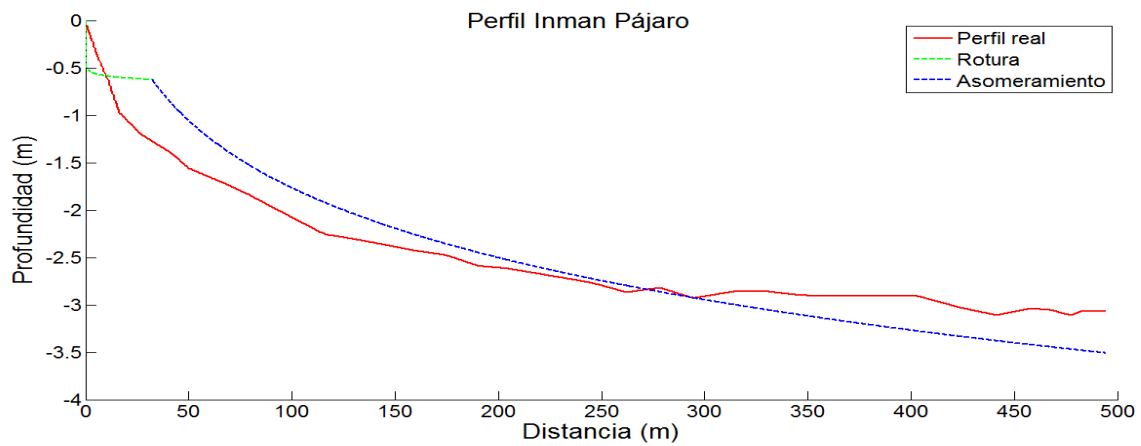


Figura 66: Perfil Inman playa de Pájaro

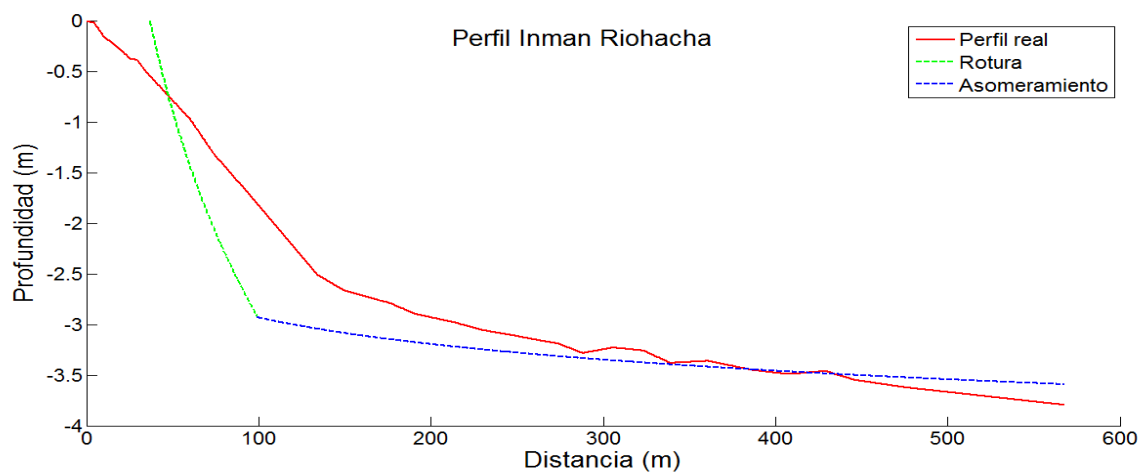


Figura 67: Ajuste Perfil Inman playa de Riohacha

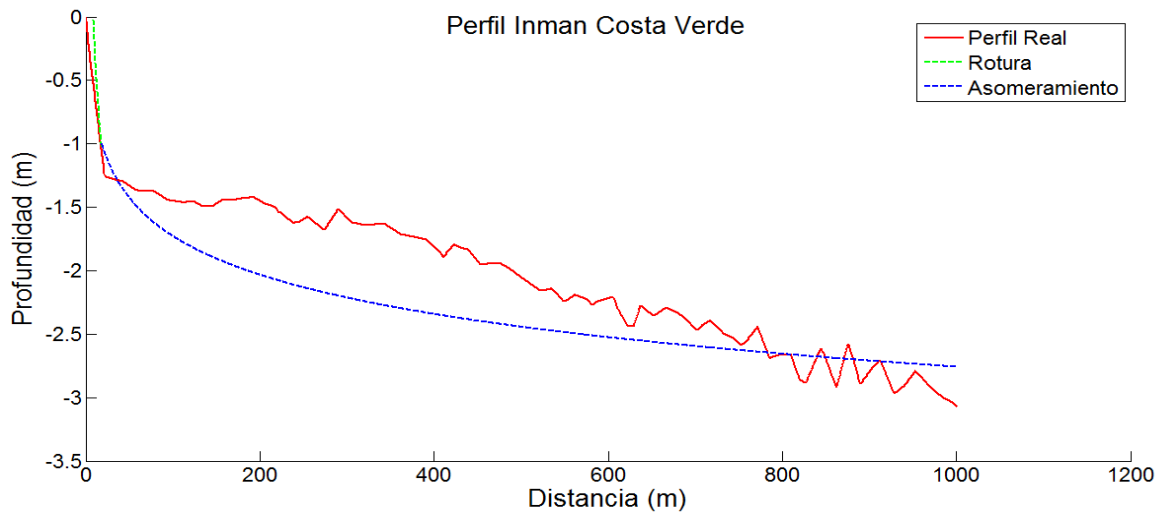


Figura 68: Ajuste Perfil Inman playa de Costa Verde

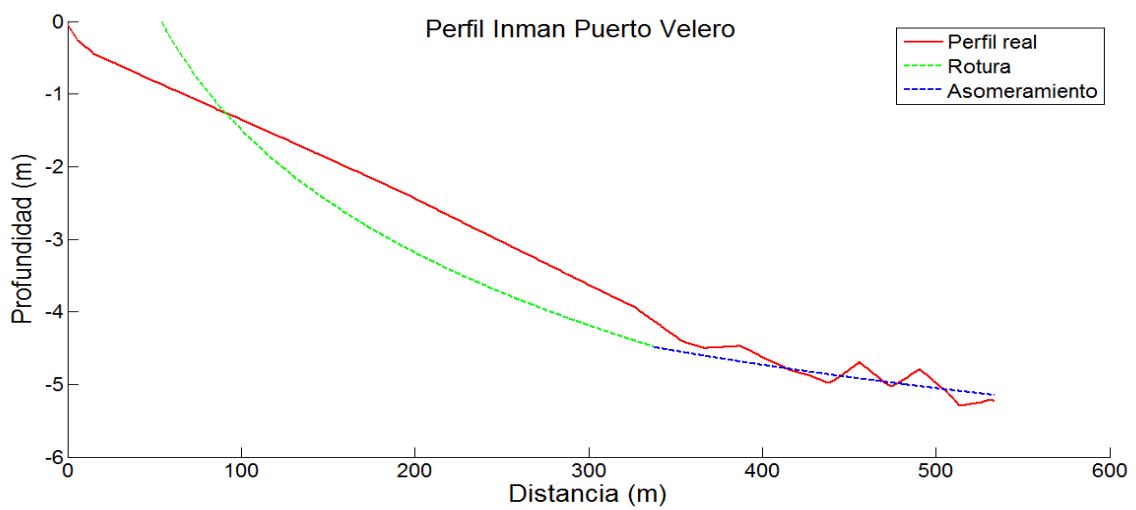


Figura 69: Ajuste Perfil Inman playa de Puerto Velero

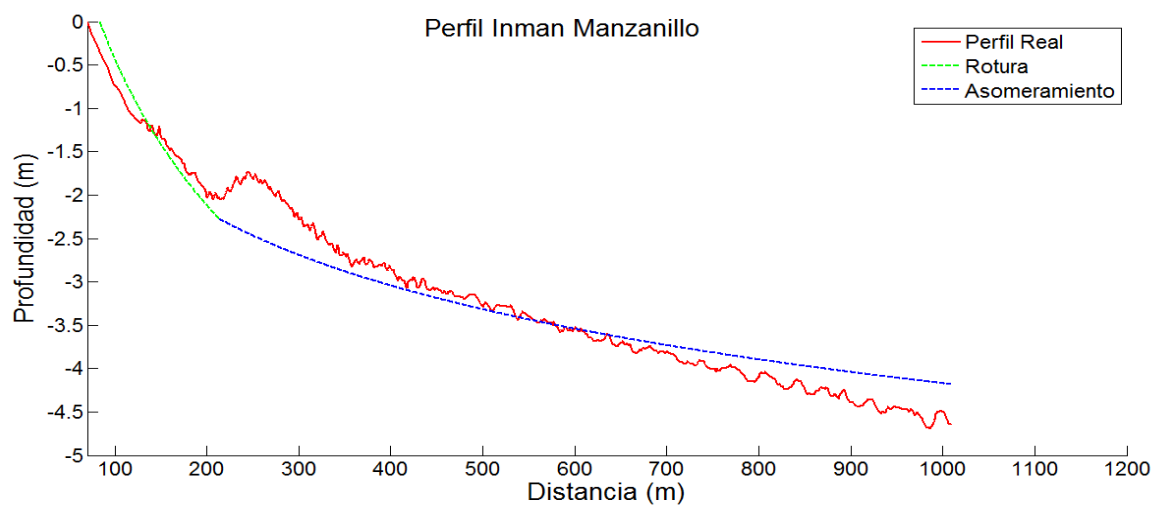


Figura 70: Ajuste Perfil Inman playa de Manzanillo

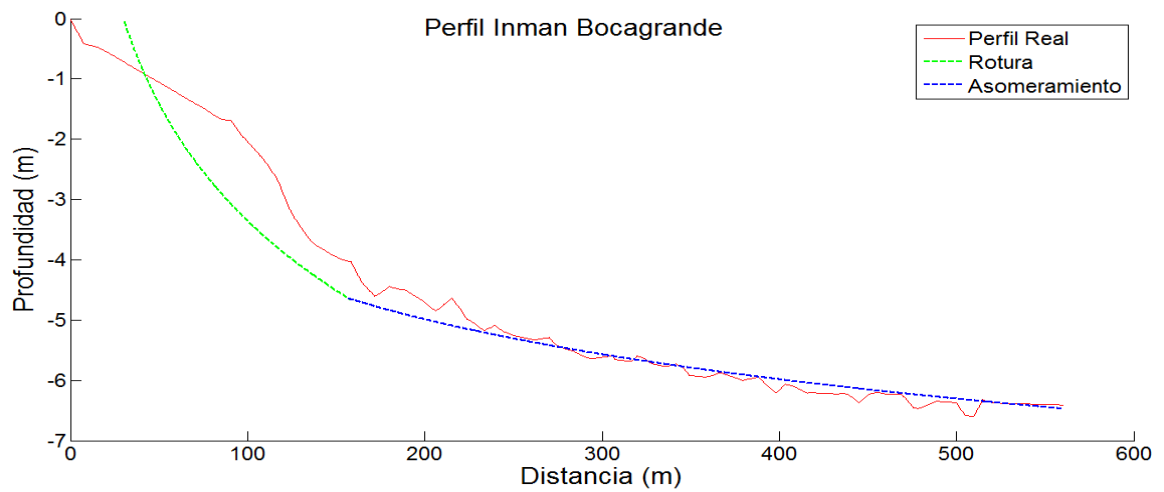


Figura 71: Ajuste Perfil Inman playa de Bocagrande

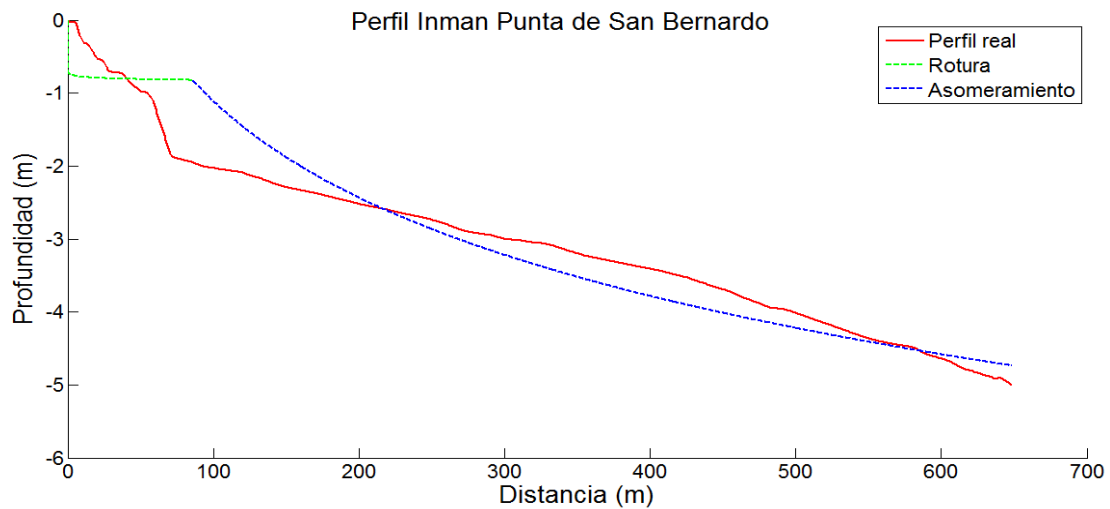


Figura 72: Ajuste Perfil Inman playa de Punta de San Bernardo

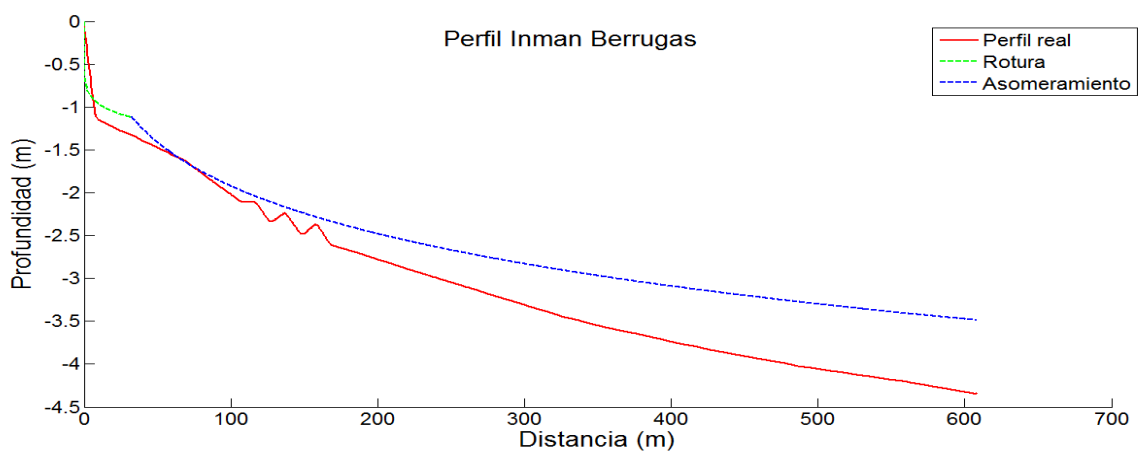


Figura 73: Ajuste Perfil Inman playa de Berrugas

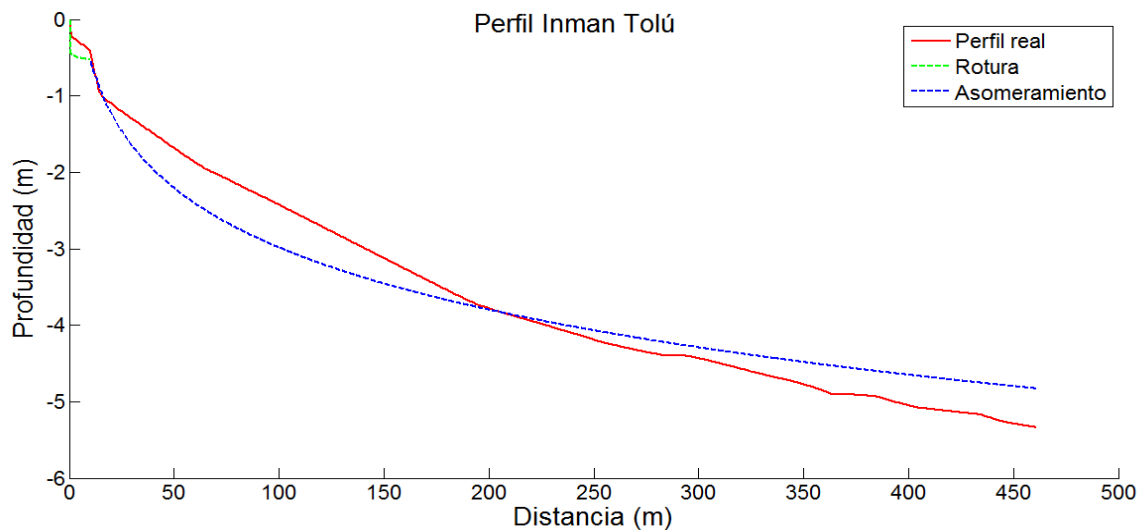


Figura 74: Ajuste Perfil Inman playa de Tolú

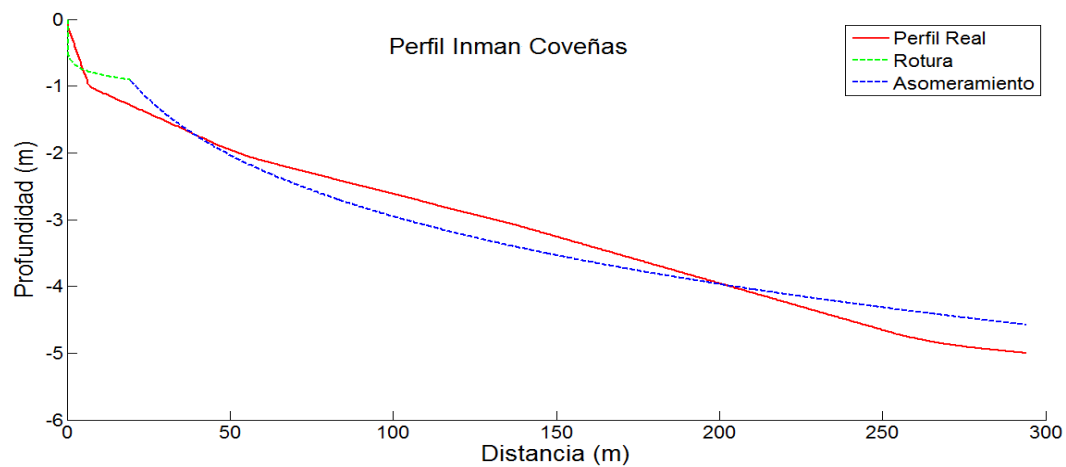


Figura 75: Ajuste Perfil Inman playa de Coveñas

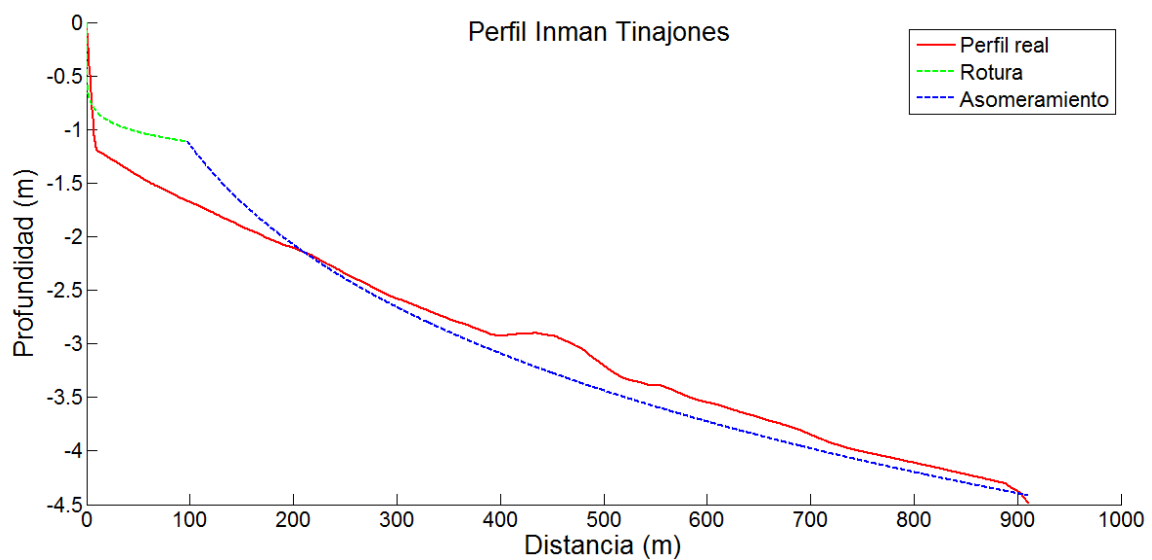


Figura 76: Ajuste Perfil Inman playa de Tinajones

Como se puede observar en cada una de las figuras anteriores y en la tabla 16, las playas del Caribe Colombiano no tienen un buen ajuste al perfil de Inman tanto para el perfil de asomeramiento como para el de rotura. En la playa de Manzanillo es la playa que posee un mejor el ajuste con un 71% para el perfil de rotura y un 90% para el asomeramiento debido a la barra que posee el perfil.

En la tabla 9 se observa la ubicación del punto de inflexión entre el perfil de asomeramiento – rotura, donde se puede presentar la barra arenosa y marca el límite de las concavidades que responden a los procesos de disipación de energía (Zetina M.C.E 2008) y los valores de la pendiente y el parámetro adimensional A que corresponden al parámetro asociado a la profundidad de la barra respecto a la marea baja, el cual varía por el desplazamiento estacional y el tamaño de sedimento.

Tabla 16: Valores de A y m para cada tramo del Perfil de Inman para las playas del Caribe Colombiano.

Playa	Rotura		Ajuste de bondad	Asomeramiento			Punto de Inflexión	
	A	m		A_2	m_2	Ajuste de bondad	X_o (m)	Y_o (m)
Berrugas	0.7141	0,13	52%	3.254	0,13	96%	32.45	-1,115
Bocagrande	129.1	0,02	8.9%	135.8	0.01	93%	160	-4.67
Costa Verde	19.35	0,06	8.3%	21.8	0,01848	74%	18.44	-0,996
Coveña	0,5987	0,14	51%	5.227	0,14	93%	19,52	-0,916
Manzanillo	231.9	0,01	71%	238.2	0,005	90%	219.2	-2,3
Pájaro	0.5155	0,05556	20%	- 14,53	0,05556	65%	32,32	- 0,6251
Puerto Velero	110.8	0,02	12.58%	116.4	0,01154	68%	338.1	-4,586
Punta San Bernardo	0.7336	0.0259	8.7%	64.89	0,0259	80%	85.6	-0.82
Riohacha	142.8	0.01912	8.13%	154.2	0,002427	79%	99.2	-2,93
Tinajona	0.6248	0,1265	43%	5.666	0,1265	75%	97.53	1.114
Tolú	0.4548	0.0639	19%	13.4	0,0639	91%	10.24	-0.6

5.4.3. AJUSTE DEL PERFIL DE BERNABEU:

De la Figura 76 a 86 se muestra el ajuste para cada una de las playas del caribe colombiano utilizando el perfil de Bernabéu y se obtienen los coeficientes que determinan la forma del perfil. Las ecuaciones para realizar el ajuste son:

$$x = \left(\frac{h}{A}\right)^{3/2} + \frac{B}{A^{3/2}} h^3$$

$$X = \left(\frac{h}{C}\right)^{3/2} + \frac{D}{C^{3/2}} h^3$$

En la tabla 16 se muestra los valores de los coeficientes para cada uno de los tramos del perfil y la bondad de ajuste.

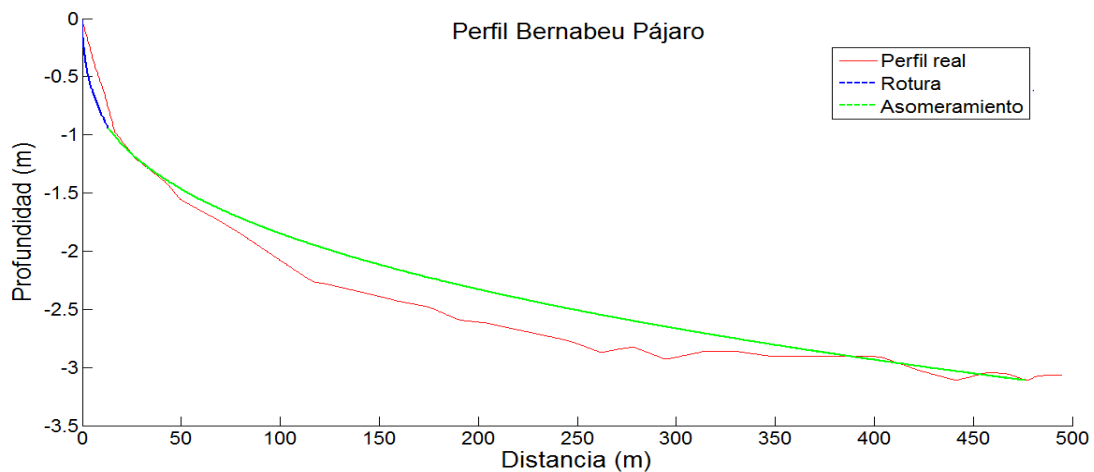


Figura 77: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Pájaro

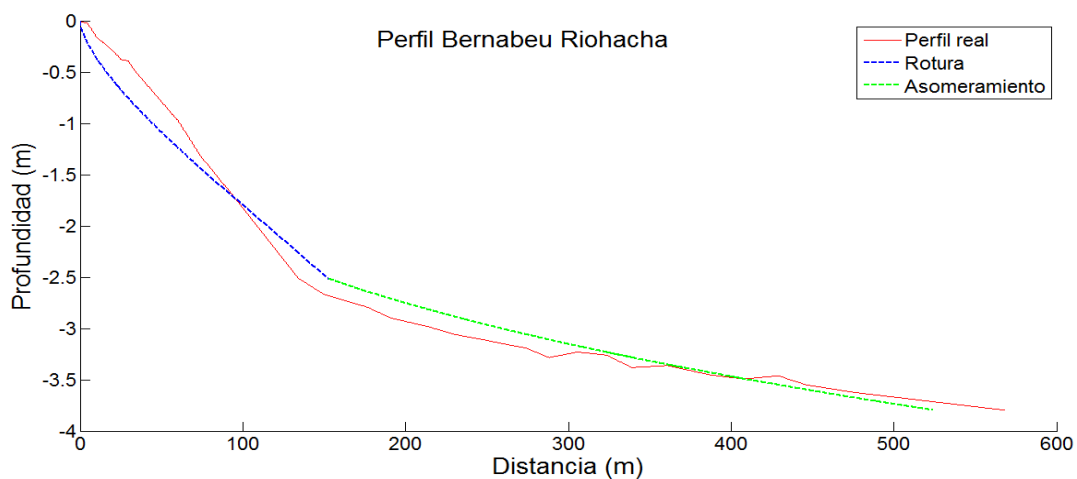


Figura 78: Ajuste perfil Bernabéu playa de Riohacha

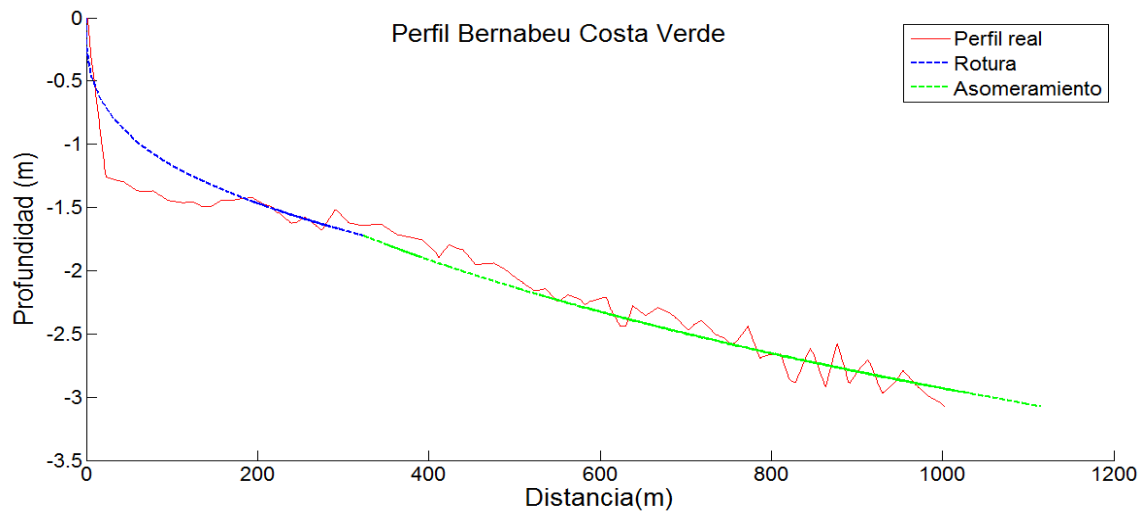


Figura 79: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Costa Verde

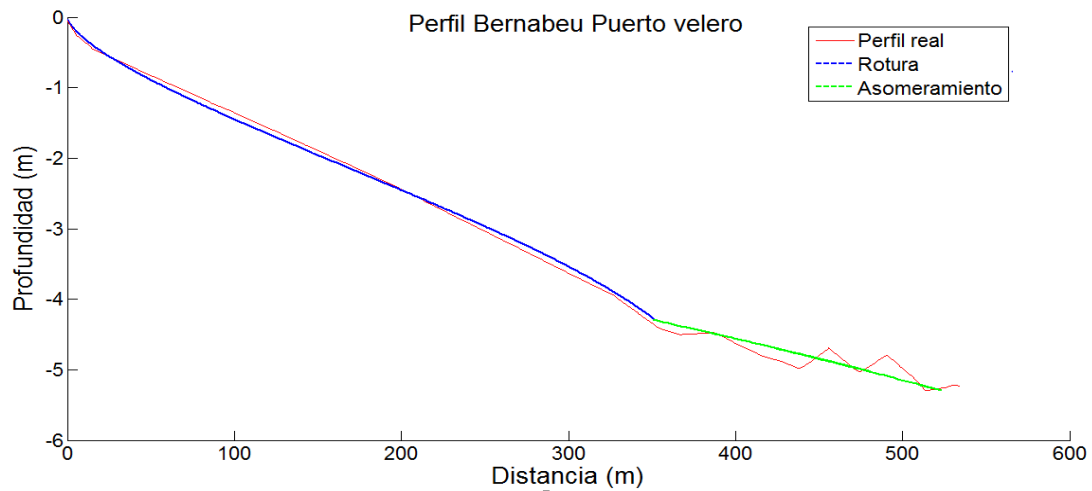


Figura 80: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Puerto Velero

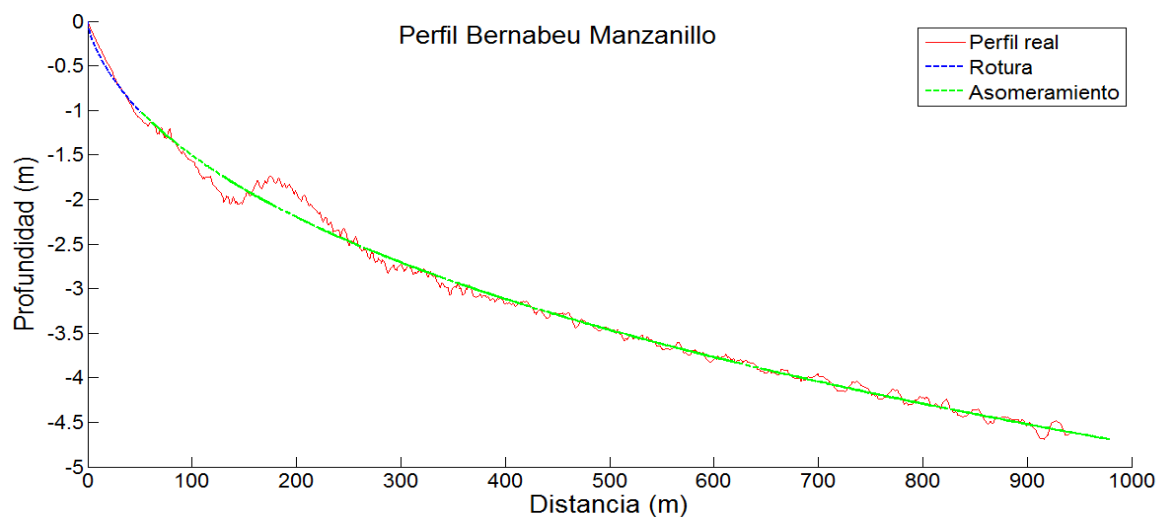


Figura 81: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Manzanillo

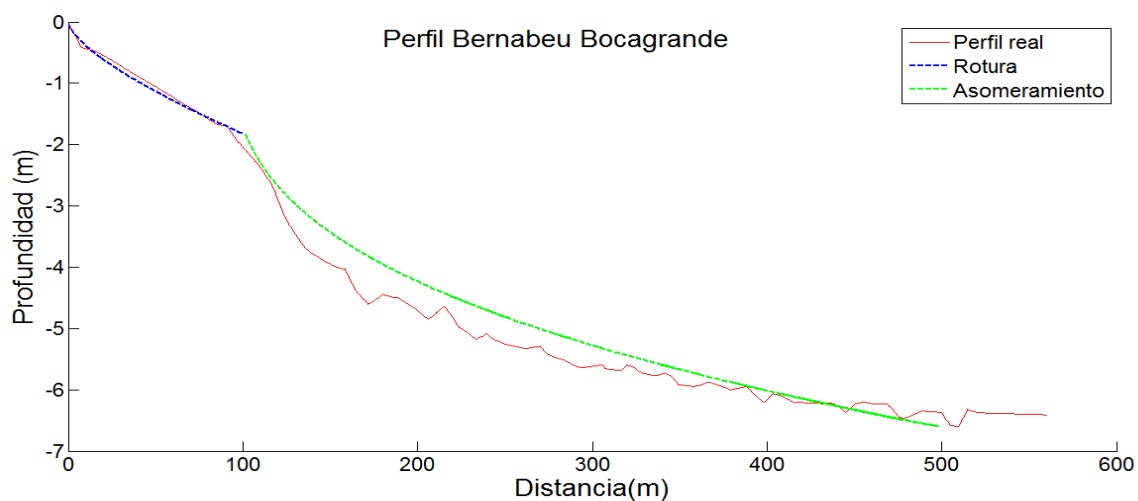


Figura 82: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Bocagrande

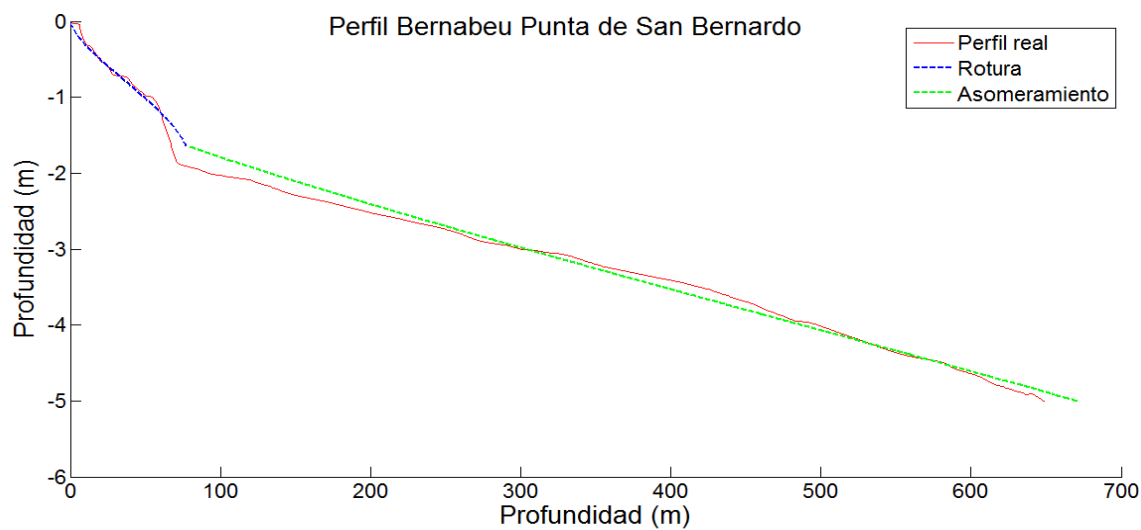


Figura 83: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Punta de San Bernardo

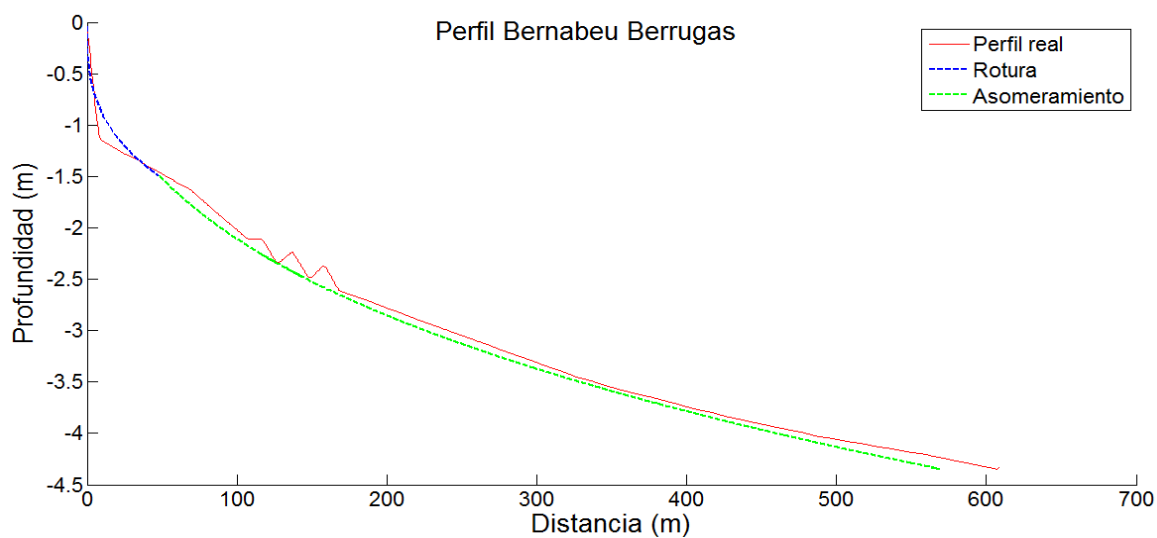


Figura 84: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Berrugas

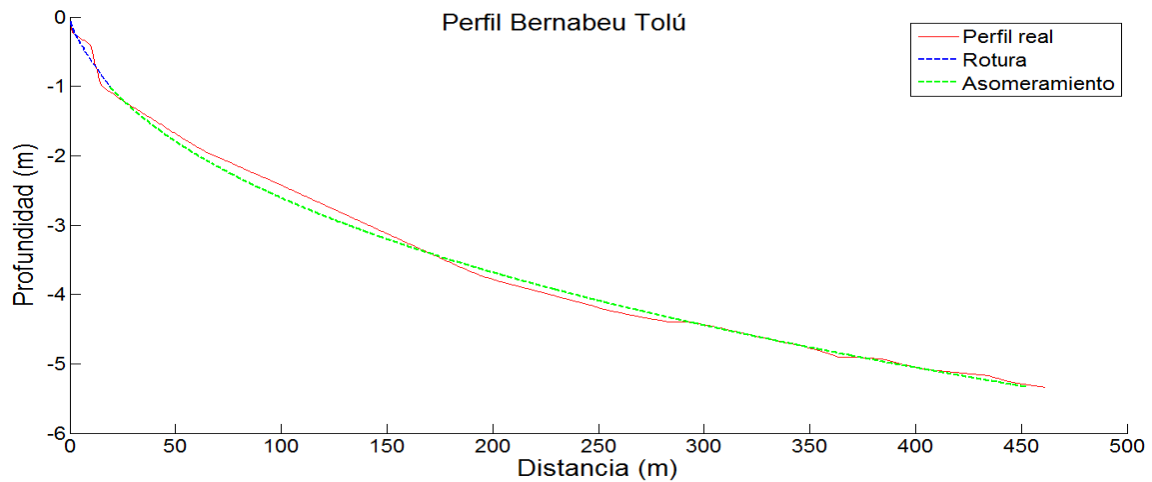


Figura 85: Ajuste perfil Bernabéu playa de Tolú

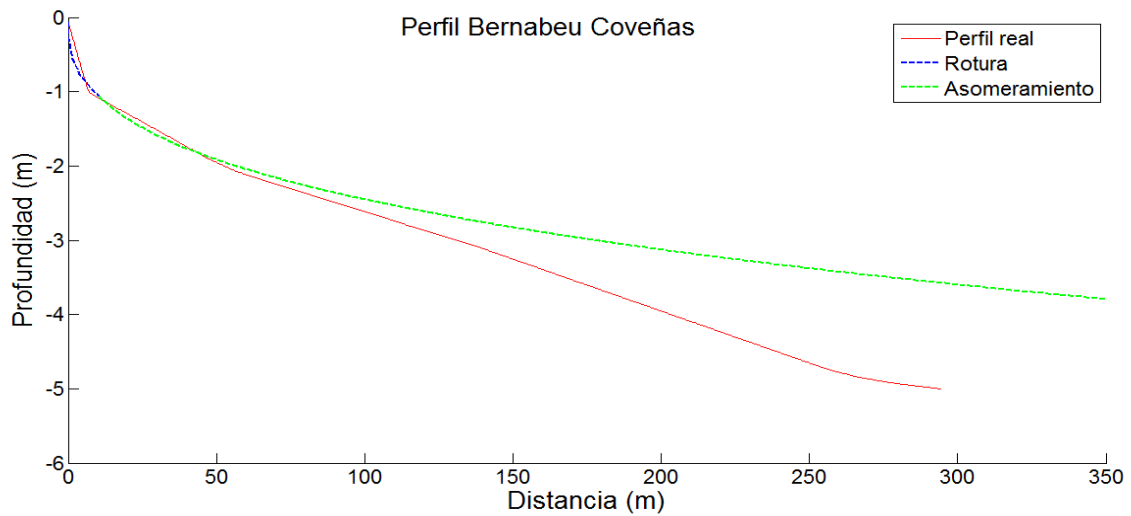


Figura 86: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Coveñas

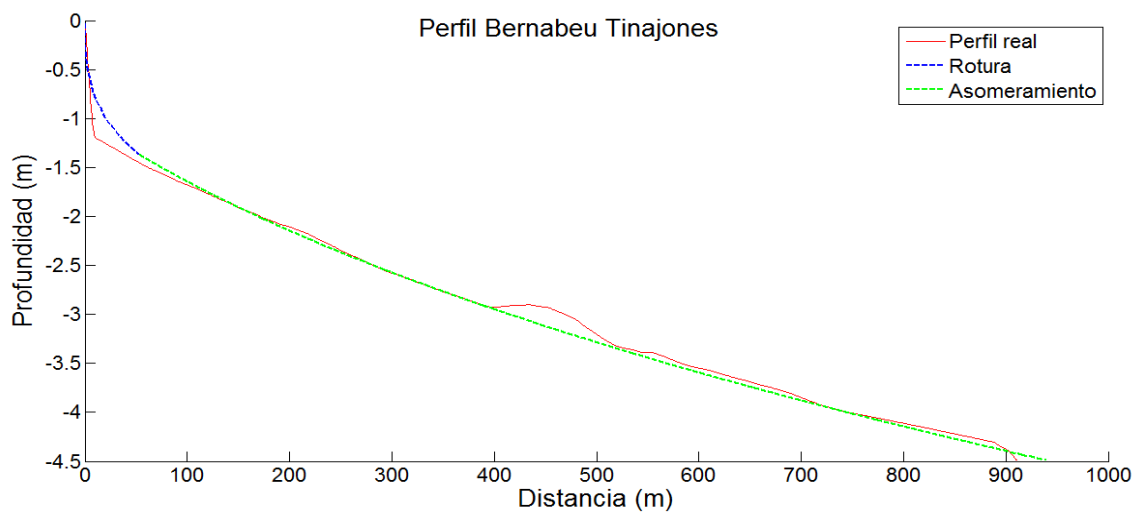


Figura 87: Ajuste Perfil Bernabéu playa de Tinajones

Como se puede observar en las figuras anteriores y en la tabla 17, el perfil de Bernabéu ajusta muy bien en las playas del Caribe Colombiano con porcentajes de ajuste de bondad entre 80% y 99%, además proporciona información detallada de la morfología de cada tramo del perfil de equilibrio (asomeramiento y rotura), por medio de los valores de los coeficientes A, B, C y D, los cuales fueron obtenidos a través del ajuste realizado a cada playa.

Los valores de los coeficientes de cada tramo del perfil para las playas del Caribe Colombiano son:

Tabla 17: Valores de los Coeficientes A, B, C y D para las playas del Caribe Colombiano.

Playas	A	B	Ajuste de Bondad	C	D	Ajuste de Bondad	Xo (m)	Yo (m)
Berrugas	5,715	196	95%	0,1494	0,2895	99%	48,1	-1,49
Bocagrande	0,08223	-0,0173	99%	20,08	187,6	91%	101,7	-1.833
Ciénaga	2,169	201,6	85%	0,04745	0,2113	94%	319,6	-1.716
Coveñas	3.971	68.36	96%	0,4841	2.025	99%	10.34	-1,058
Manzanillo	0.07708	0.04404	93%	0,07928	0,1135	99%	52.49	-1,031
Pájaro	0,3168	1,733	99%	5,261	190,6	91%	111,6	-2,133
Puerto Velero	0,06418	-0,0401	99%	0,04488	-0,0237	87%	352,8	-4,305
Punta de San Bernardo	0,06504	-0.187	96%	0,05288	-0,0154	98%	79.4	-1.65
Riohacha	0.07729	-0,0447	95%	7.736	205.9	95%	153.4	-2,52
Tinajona	4.834	221	96%	0,05291	0,0326	99%	52.95	-1.366
Tolú	0,1265	-0,1614	92%	0,1515	0,09453	99%	19	-1.014

Después del estudio de cada uno de los perfiles se puede observar que el perfil que mejor puede describir la morfología de las playas del Caribe Colombiano es el perfil de dos tramos de Bernabéu ya que el perfil de Dean debido que es una formulación matemática sencilla que relaciona el tamaño de sedimento y la velocidad de caída de grano con la forma del perfil, no ajusta bien todas las playas del Caribe Colombiano. Por su parte, el perfil de Inman, no tiene un

buen ajuste para el Caribe Colombiano. El perfil de Bernabéu permite tratar de forma separada cada forma del perfil de playa sometidos a procesos hidrodinámicos distintos, el poder diferenciar entre el tramo de asomeramiento y el de rotura permite mostrar con más detalle la morfología de cada parte del perfil permitiendo clasificar las playas según su forma, sedimento y pendiente a través de los coeficientes A, B, C y D.

CAPITULO 6

CARACTERÍSTICAS DE LAS PLAYAS A PARTIR DEL AJUSTE DEL PERFIL BERNABEU Y EL NÚMERO DE IRIBARREN

En este capítulo se analizó en detalle el modelo de perfil de equilibrio de Bernabéu, a través de los coeficientes de forma mostrados en la tabla 17. Para determinar los estados de playa propuestos por Wright y Short (1984), para cada una de las playas del Caribe Colombiano, se utilizó también la información mostrada en la tabla 18 y el número de Iribarren para clasificar las playas por el tipo de rotura y verificar la clasificación realizada a cada playa según los estados de estas.

Dentro del modelo, cada uno de los tramos del perfil viene caracterizado por los coeficientes asociados a la disipación (A y C) que determinan la pendiente del inicio del perfil y asociados a la reflexión (B y D) que determinan la pendiente en la zona más profunda.

Perfil de Rotura	$\downarrow A$	Pendiente inicial tendida	Perfil Disipativo
	$\downarrow\downarrow B$	Pendiente aguas adentro pronunciada	
Perfil de Asomeramiento	$\uparrow C$	Pendiente inicial pronunciada	
	$\downarrow\downarrow D$	Pendiente aguas adentro pronunciada	
Perfil de Rotura	$\uparrow A$	Pendiente inicial pronunciada	Perfil reflejante
	$\uparrow B$	Pendiente aguas adentro tendida	
Perfil de Asomeramiento	$\downarrow C$	Pendiente inicial tendida	
	$\uparrow D$	Pendiente aguas adentro tendida	

Tabla 18: Relación entre el modelo de perfil de Bernabéu y el modelo de Wright y Short

El número de Iribarren I_r o parámetro de rompientes es ampliamente aceptado como indicador del tipo de rotura. El número de Iribarren viene dado por:

$$I_r = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_o}{L_o}}} \quad (11) \text{ Número de Iribarren en aguas profundas.}$$

$$I_{rb} = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_b}{L_o}}} \quad (12) \text{ Número de Iribarren aguas someras}$$

Siendo m la pendiente de la playa, H_o la altura de ola en aguas profundas, H_b la altura de la ola rotura y L_o la longitud de onda en profundidades donde la ola no se ve afectada por el fondo, que viene dado por: (Martínez, 2013)

$$L_o = \frac{g * T_p^2}{2\pi} \quad (13) \text{ Valor de } L_o$$

Donde g es el valor de la gravedad y T_p es el periodo de pico.

De igual forma se calculó el parámetro de la velocidad de caída de sedimento Ω , el cual según el modelo Wright y Short para playas micromareales describe la caracterización del estado modal de las playas.

$$\Omega = H/wT \quad (11)$$

En donde H es la altura significativa de la ola en rotura media mensual correspondiente a los treinta días anteriores antes de la medición del perfil de playa, T es el periodo pico medio mensual antes de la medición del perfil de playa y w es la velocidad de caída del sedimento característico de la playa. Para H y T se tomó la medida dada por las series WW3 propagada, del mes anterior de la medición del perfil de cada una de las playas y w se halló por medio del D_{50} medido en las campañas de campo del grupo de investigación en Geociencias GEO4 y de la consulta de estudios realizados en las zonas estudiadas.

Los resultados de Ω para cada una de las playas se muestran en la tabla 19.

Tabla 19: Valores de Ω para las playas del Caribe Colombiano

PLAYA	HS	TP	D50 (M)	WS	OMEGA	TIPO DE PLAYA
COSTA VERDE	0,68	6,3	0,00033	0,04	2,67	Barra Transversal y corriente de retorno
PUERTO VELERO	0,81	6,6	0,0002	0,023	5,27	Disipativa
MANZANILLO	0,61	6,5	0,00015	0,017	5,53	Disipativa
BOCAGRANDE	0,89	6,7	0,00025	0,03	4,46	Barra Longitudinal y Seno
SAN BERNARDO	0,7	9	0,0002	0,023	3,34	Barra y Playa Rítmica
BERRUGAS	0,52	9	0,00025	0,03	1,94	Barra- Canaleta
TOLU	0,62	9	0,0002	0,023	2,96	Barra Transversal y corriente de retorno
COVEÑAS	0,68	9	0,0004	0,05	1,51	Reflejante
TINAJONES	0,87	9	0,00022	0,026	3,74	Barra y Playa Rítmica
RIOHACHA	0,71	7,5	0,0002	0,023	4,06	Barra Longitudinal y Seno
PAJARO	0,85	7,6	0,0002	0,023	4,8	Barra Longitudinal y Seno

Para realizar la descripción morfológica se tomaron en cuenta los rangos de valores para cada uno de los coeficientes A, B, C y D mostrados en la tabla 20, tomados de Bernabeu (2012).

Tabla 20: Rango de valores para los coeficientes de Bernabeu.

COEFICIENTES	PEQUEÑO	GRANDE
A	0.01 - 0.17	≥ 0.18
B	0.001 - 0.1	0.11 Y MÁS
C	0.01 - 0.29	0.3 Y MÁS
D	0.001 - 0.09	0.1 Y MÁS

6.1. PAJARO:

Los valores de los coeficientes de forma para esta playa se muestran en la Figura 87, en donde podemos ver que A está en el rango de los valores grande para este coeficiente lo cual nos indica una pendiente al inicio del perfil de rotura es un poco pronunciada, B en el rango de los valores grande lo cual nos indica una pendiente al final del perfil de rotura es algo tendida, mientras que C y D están en el rango de valores grandes los cuales muestran que el perfil de asomeramiento es primero pronunciado y después tendido, mostrando una playa en estado intermedio. Teniendo en cuenta el tipo de sedimento y la pendiente de la playa, Pájaro es una playa intermedia, por lo tanto la descripción de los coeficientes nos muestra concordancia con la descripción morfológica descrita por esos parámetros.

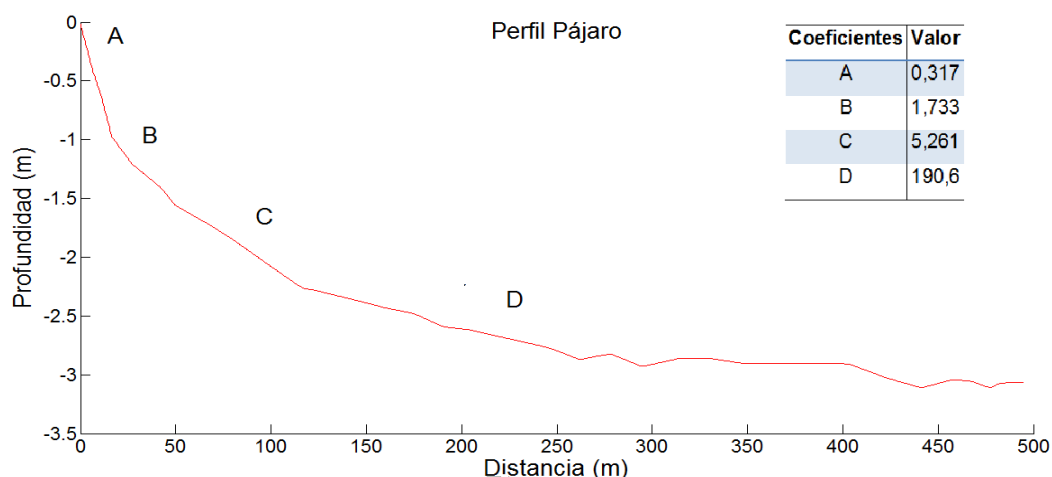


Figura 88: Coeficientes de la forma de perfil playa de Pájaro

En la Figura 88 se muestran los valores de Iribarren I_r y I_{rb} para ratificar la clasificación realizada con el ajuste realizado en el perfil de Bernabeu.

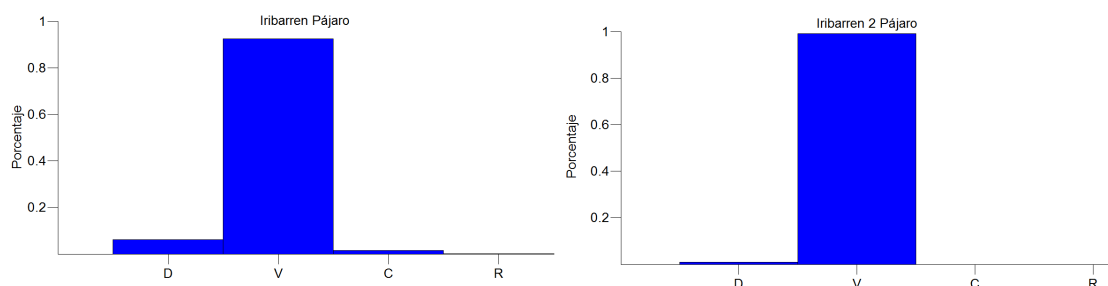


Figura 89: Porcentaje I_r y I_{rb} para playa de pájaro

Los resultados de los cálculos del número de Iribarren y del número de Iribarren en rotura mostrados en la Figura 88, nos da como resultado que la mayor parte del tiempo la rotura es de tipo voluta, aunque pueden encontrarse en algunas oportunidades una rotura tipo descrestamiento, característico de playas intermedias, en donde en el momento de la rotura hay una considerable cantidad de energía disipada. Teniendo en cuenta el resultado de la tabla 19 en donde Ω para esta playa es igual a 4,8 que de acuerdo con Wright y Short corresponde a una playa intermedia disipativa del tipo Barra Longitudinal y Seno. Este tipo de playa se caracteriza por tener una zona de ascenso – descenso de gran amplitud y los sistemas circulatorios pueden presentar beach – cusps en el frente de playa y rips débiles. Es importante resaltar que los coeficientes ajustados por las expresiones de Bernabéu, el número de Iribarren y Ω coinciden con la descripción y clasificación del tipo de playa.

6.2. RIOHACHA

Los valores de los coeficientes de forma para esta playa se muestran en la Figura 89, en donde podemos ver que A es pequeño lo cual nos dará una pendiente al inicio del perfil de rotura tendida, B es pequeño lo cual nos indica pendiente al final del perfil de rotura es pronunciada, mientras que C y D son grandes los cuales muestran que el perfil de asomeramiento es primero ligeramente pronunciado y después tendido, mostrando una playa en estado intermedio disipativo. Teniendo en cuenta el tipo de sedimento y la pendiente de la playa la descripción de los coeficientes concuerdan con la descripción morfológica descrita por esos parámetros.

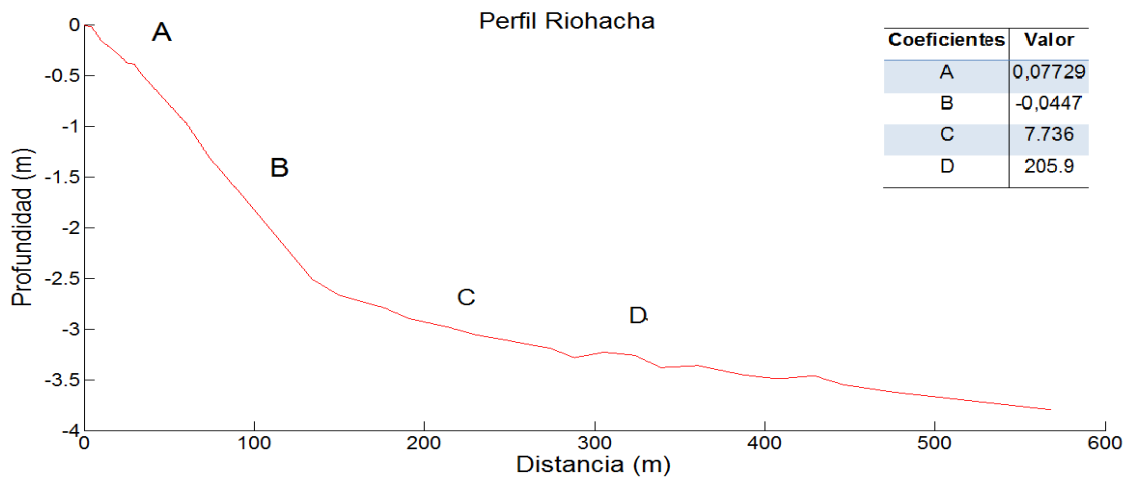


Figura 90: Coeficiente de la forma de perfil Riohacha

En la Figura 90 se observan los valores de I_r y I_{rb} para playa Riohacha:

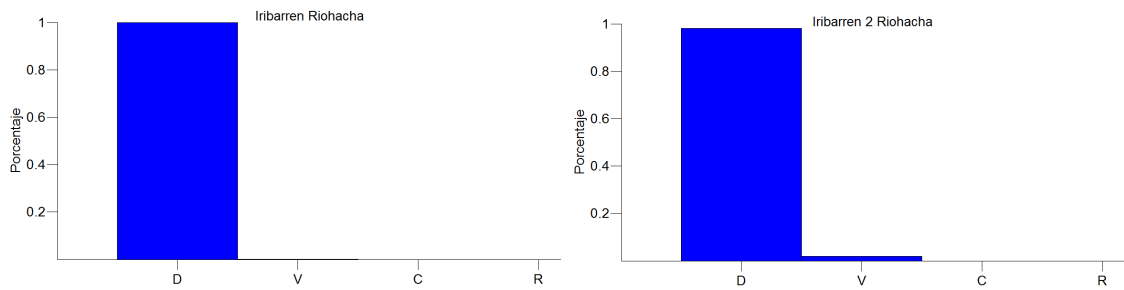


Figura 91: Porcentaje I_r y I_{rb} para playa Riohacha.

El número de Iribarren y el número de Iribarren en rotura mostrados en la Figura 90, nos dicen que la rotura es de tipo descrestamiento, con muy poca frecuencia se puede encontrar una rotura tipo voluta, característico de playas disipativas e intermedio disipativas en donde se puede ver de manera gradual una gran disipación de energía. Teniendo en cuenta la información contenida en la tabla 19 en donde Ω para esta playa es igual a 4,06 de acuerdo con la clasificación realizada con Wright y Short la play de Riohacha corresponde a una playa intermedia disipativa del tipo Barra Longitudinal y Seno, la cual se caracteriza por tener una zona de ascenso – descenso de gran amplitud y los sistemas circulatorios pueden presentar beach – cusps en el frente de playa y rips débiles. Teniendo en cuenta esta información cabe resaltar que los resultados anteriores concuerdan con la información descrita para este tipo de playa

6.3. COSTA VERDE:

Los valores de los coeficientes de forma para esta playa se muestran en la Figura 91, en donde podemos ver que A es grande lo cual nos indica una pendiente al inicio del perfil de rotura pronunciada, B es muy grande lo cual nos indica una pendiente al final del perfil de rotura es tendida, mientras que C pequeño el cuales muestra que el perfil de asomeramiento es primero tendido D es grande nos indica que el perfil sigue tendido, mostrando una playa en estado intermedio. Teniendo en cuenta el tipo de sedimento y la pendiente de la playa la descripción de los coeficientes muestra una playa intermedia, lo cual tiene algo de concordancia con la descripción morfológica descrita por esos parámetros.

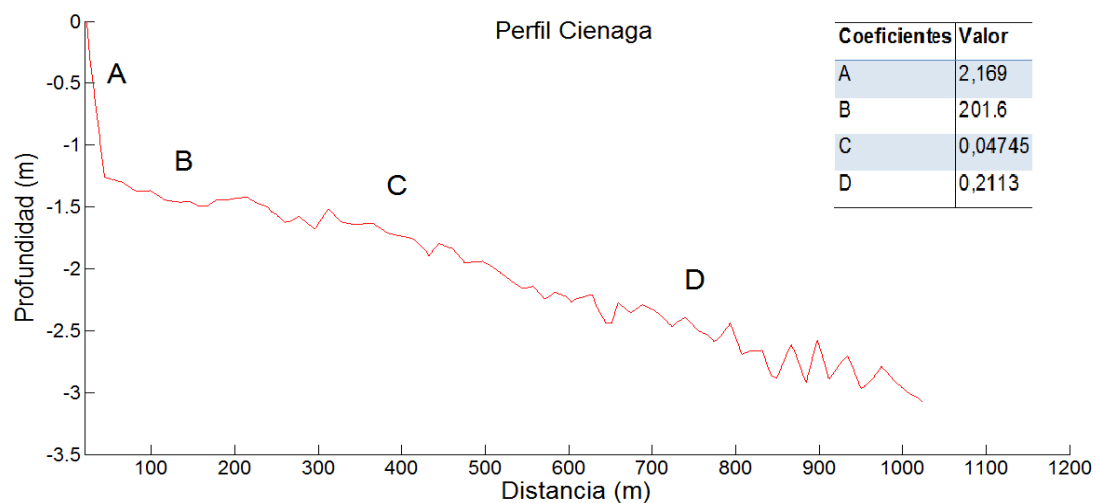
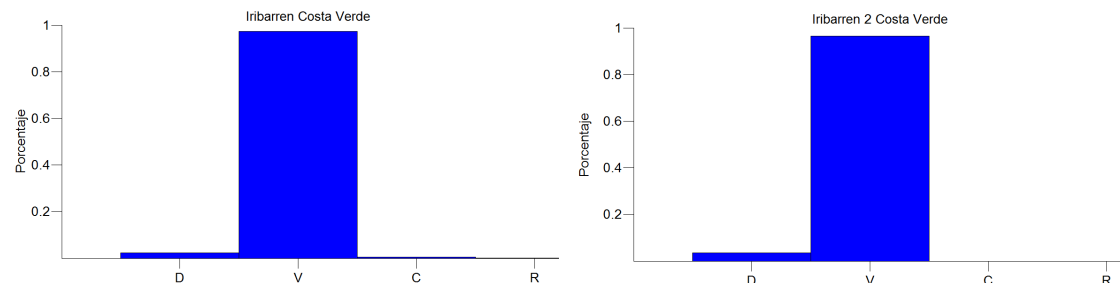


Figura 92: Coeficientes de forma de perfil Costa Verde

En la Figura 92 se muestra los porcentajes de encontrar los valores de Iribarren *Ir* para ratificar la clasificación realizada con los coeficientes hallados con el ajuste realizado por el perfil de Bernabeu



*Figura 93: Porcentaje *Ir* para playa Costa Verde*

Según el número de Iribarren y el número de Iribarren en rotura mostrados en la Figura 92, nos da como resultado que la mayor parte del tiempo la rotura es

de tipo voluta, aunque pueden encontrarse en algunas oportunidades una rotura tipo descrestamiento, característico de playas intermedias. Teniendo en cuenta el resultado de la tabla 19 en donde Ω para esta playa es igual a 2,67 que de acuerdo con Wright y Short corresponde a una playa intermedia reflejante del tipo Barra Canaleta, la cual se caracteriza por tener fuerte circulación rítmica que desaparece a medida que se acerca a la playa, pueden presentarse pequeñas corrientes de retorno y unos cusps pronunciados. Teniendo en cuenta esta información cabe resaltar que los resultados anteriores concuerdan con la información descrita para este tipo de playa.

6.4. PUERTO VELERO

Los valores de los coeficientes de forma para esta playa se muestran en la Figura 93, en donde podemos ver que A es pequeño lo cual nos indica una pendiente al inicio del perfil de rotura tendida, B es pequeño lo cual nos indica una pendiente al final del perfil de rotura es pronunciada, mientras que C y D son pequeños los cuales muestran que el perfil de asomeramiento es primero tendido y después pronunciado, mostrando una playa en estado disipativo. Teniendo en cuenta el tipo de sedimento y la pendiente de la playa la descripción de los coeficientes concuerdan con la descripción morfológica descrita por esos parámetros.

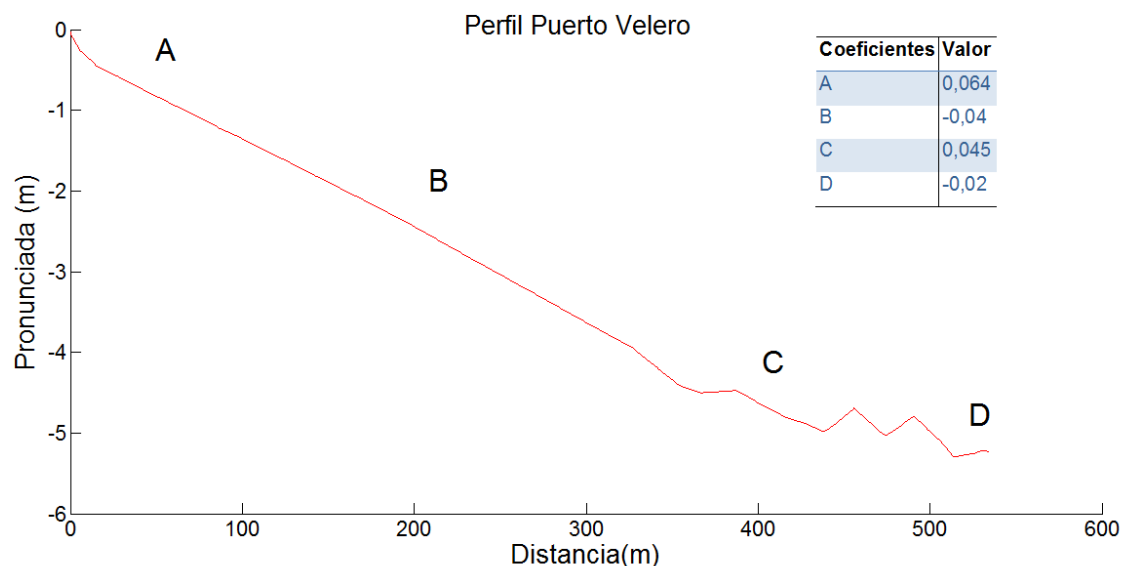


Figura 94: Coeficiente de forma de perfil Puerto Velero

En la Figura 94 muestra los valores de I_r y I_{rb} para la playa de Puerto Velero

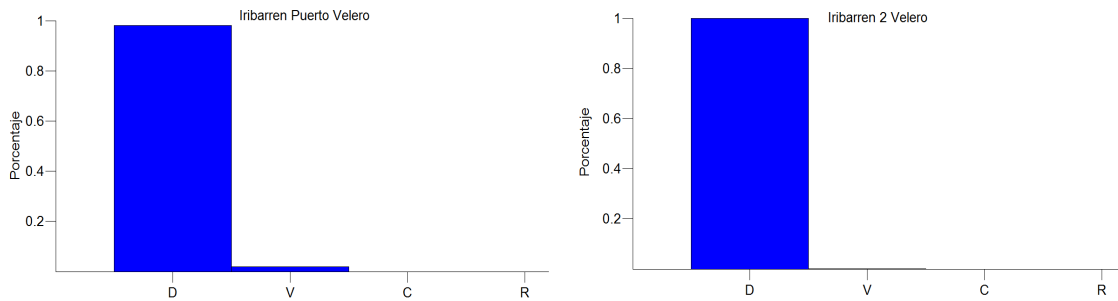


Figura 95: Porcentaje de Ir y Irb para playa Puerto Velero

Según lo que se puede observar en la Figura 94 la rotura es tipo descrestamiento, característico de playas disipativas, lo cual indica una gran disipación de energía en la zona de rompientes. Teniendo en cuenta la información contenida en la tabla 19 en donde Ω es igual a 5,27 que de acuerdo con Wright y Short corresponde a una playa disipativa, la cual se caracteriza por tener unos sistemas circulatorios en donde hay oscilaciones de Surf Beat estacionarios en la dirección normal a la costa. Es importante resaltar que los coeficientes ajustados por las expresiones de Bernabéu, el número de Iribarren y Ω coinciden con la descripción y clasificación del tipo de playa.

6.5. MANZANILLO

Los valores de los coeficientes de forma para esta playa se muestran en la Figura 95, en donde podemos ver que A es pequeño lo cual nos indica una pendiente al inicio del perfil de rotura tendida, B es pequeño lo cual nos indica una pendiente al final del perfil de rotura es pronunciada, mientras que C es pequeño los cual muestran que el perfil de asomeramiento es primero tendido y D es grande lo cual nos indica que el perfil sigue tendido, mostrando una playa en estado intermedio. Teniendo en cuenta el tipo de sedimento y la pendiente de la playa la descripción de los coeficientes concuerdan con la descripción morfológica descrita por esos parámetros.

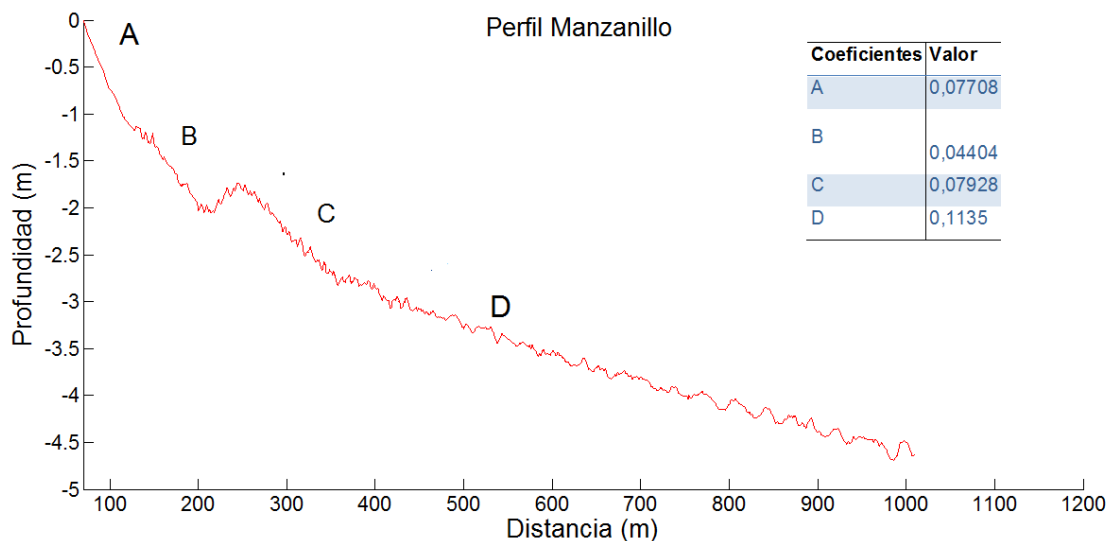


Figura 96: Coeficientes de la forma del perfil de playa Manzanillo.

En la Figura 96 se muestra los valores de Iribarren I_r y I_{rb} para ratificar la clasificación realizada con el ajuste realizado en el perfil de Bernabeu.

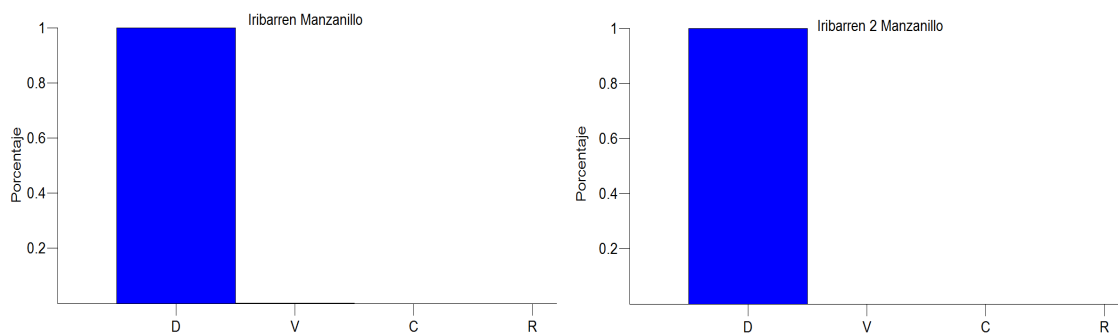


Figura 97: Porcentaje de I_r y I_{rb} para playa Manzanillo

Según lo que se puede observar en la Figura 96 por el número de Iribarren el oleaje tiene una rotura de manera gradual con una gran disipación de energía, esta rotura es de tipo descrestamiento característico de playas disipativas. Teniendo en cuenta la información contenida en la tabla 19 en donde Ω es igual a 5,53 que de acuerdo con Wright y Short corresponde a una playa disipativa, la cual se caracteriza por tener unos sistemas circulatorios en donde hay oscilaciones de Surf Beat estacionarios en la dirección normal a la costa. Esta información coincide la clasificación del tipo de playa.

6.6. BOCAGRANDE:

Los valores de los coeficientes de forma para esta playa se muestran en la Figura 97, en donde podemos ver que A es pequeño lo cual nos indica una pendiente al inicio del perfil de rotura tendida, B es muy pequeño lo cual nos indica una pendiente al final del perfil de rotura es pronunciada, mientras que C y D son altos los cuales muestran que el perfil de asomeramiento es primero pronunciada y después un tendida, mostrando una playa en estado intermedio disipativo. Teniendo en cuenta el tipo de sedimento y la pendiente de la playa la descripción de los coeficientes concuerdan con la descripción morfológica descrita por esos parámetros.

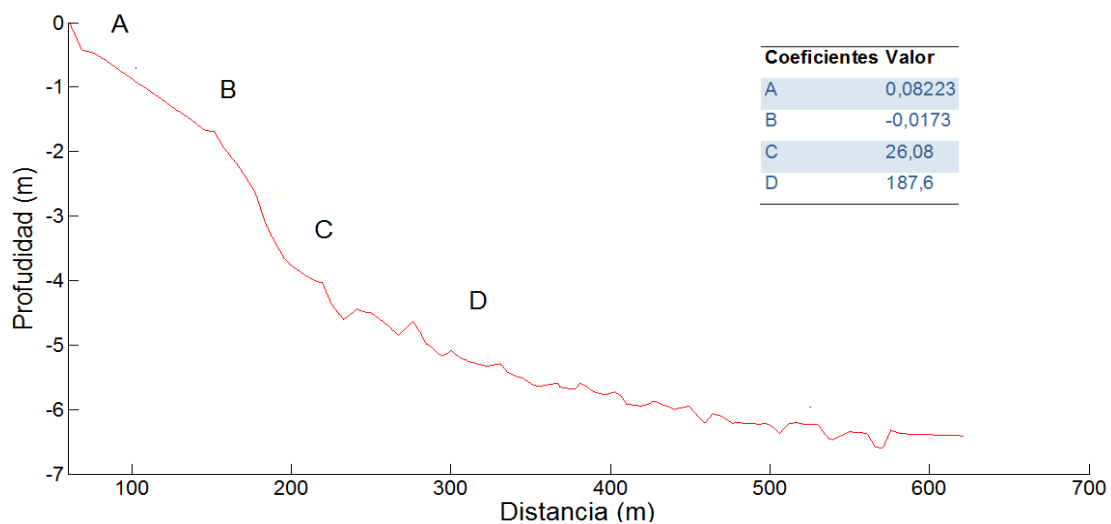


Figura 98: Coeficiente de Forma de Perfil playa Bocagrande

En la Figura 98 se muestra los valores de Iribarren I_r y I_{rb} para ratificar la clasificación realizada con el ajuste realizado en el perfil de Bernabéu.

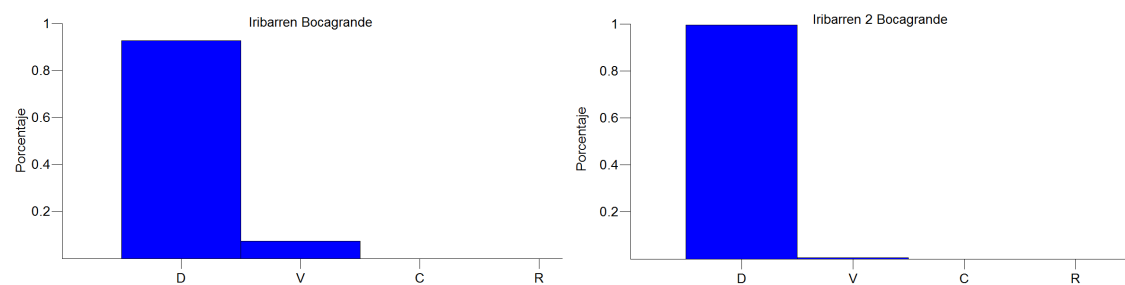


Figura 99: Porcentaje I_r y I_{rb} para playa Bocagrande

Reafirmando la clasificación realizada con los coeficientes hallados del ajuste de Bernabéu, se utiliza el número de Iribarren, con lo que se puede observar en la Figura 98 que la rotura es tipo descrestamiento, aunque pueden encontrarse en algunas oportunidades una rotura tipo voluta, típico de playas disipativas e

intermedias disipativas. Teniendo en cuenta el resultado de la tabla 19 en donde Ω para esta playa es igual a 4,46 que de acuerdo con Wright y Short corresponde a una playa intermedia disipativa del tipo Barra Longitudinal y Seno, la cual se caracteriza por tener una zona de ascenso – descenso de gran amplitud y los sistemas circulatorios que pueden presentar beach – cusps en el frente de playa y rips débiles. Es importante resaltar que los coeficientes ajustados por las expresiones de Bernabéu, el número de Iribarren y Ω coinciden con la descripción y clasificación del tipo de playa.

6.7. PUNTA SAN BERNARDO

Los valores de los coeficientes de forma para esta playa se muestran en la Figura 99, en donde podemos ver que A es pequeño lo cual nos dará una pendiente al inicio del perfil de rotura tendida, B es pequeño lo cual nos indica una pendiente al final del perfil de rotura es algo pronunciada, mientras que C y D son pequeños los cuales muestran que el perfil de asomeramiento es primero tendido y después pronunciado, mostrando una playa en estado intermedio disipativa. Teniendo en cuenta el tipo de sedimento y la pendiente de la playa la descripción de los coeficientes concuerdan con la descripción morfológica descrita por esos parámetros:

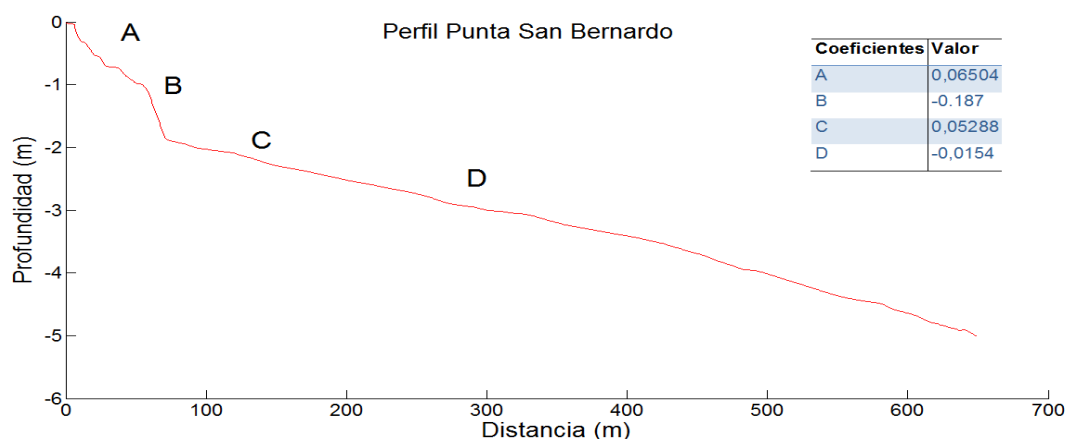


Figura 100: Coeficiente de forma de perfil Punta de San Bernardo

En la Figura 100 se muestran los valores de Iribarren I_r y I_{rb} para ratificar la clasificación realizada con el ajuste realizado en el perfil de Bernabeu.

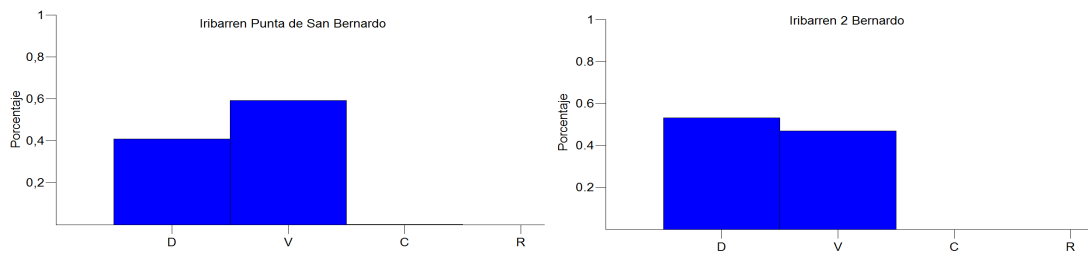


Figura 101: Porcentaje Irb para playa Punta de San Bernardo

Los resultados de la clasificación realizada se utiliza el número de Iribarren al pie de playa, con lo que se puede observar en la Figura 100 que en el pie de playa la rotura es tipo Voluta y con posibilidades de encontrar una rotura tipo descrestamiento, característico de playas Intermedias disipativas, en donde en el momento de la rotura drástica hay una considerable cantidad de energía disipada. Teniendo en cuenta el resultado de la tabla 19 en donde Ω para esta playa es igual a 3,34 que de acuerdo con Wright y Short corresponde a una playa intermedia disipativa del tipo Barra y playa rítmica, la cual se caracteriza por un sistemas circulatorios en donde se presentan corrientes transversales y unas corrientes longitudinales débiles que encuentran su retorno sobre el rip, donde el flujo neto transversal es claramente hacia el mar. Es importante resaltar que los coeficientes ajustados por las expresiones de Bernabéu, el número de Iribarren y Ω coinciden con la descripción y clasificación del tipo de playa.

6.8. BERRUGAS

Los valores de los coeficientes de forma para esta playa se muestran en la Figura 101, en donde podemos ver que A es grande lo cual nos indica una pendiente al inicio del perfil de rotura pronunciada, B es grande lo cual nos indica una pendiente al final del perfil de rotura es tendida, mientras que C es pequeño el cual muestra que el perfil de asomeramiento es primero tendido y D es grande lo que indica que después un poco pronunciado, mostrando una playa en estado intermedio reflejante, teniendo en cuenta el tipo de sedimento y la pendiente de la playa la descripción de los coeficientes concuerdan con la descripción morfológica descrita por esos parámetros:

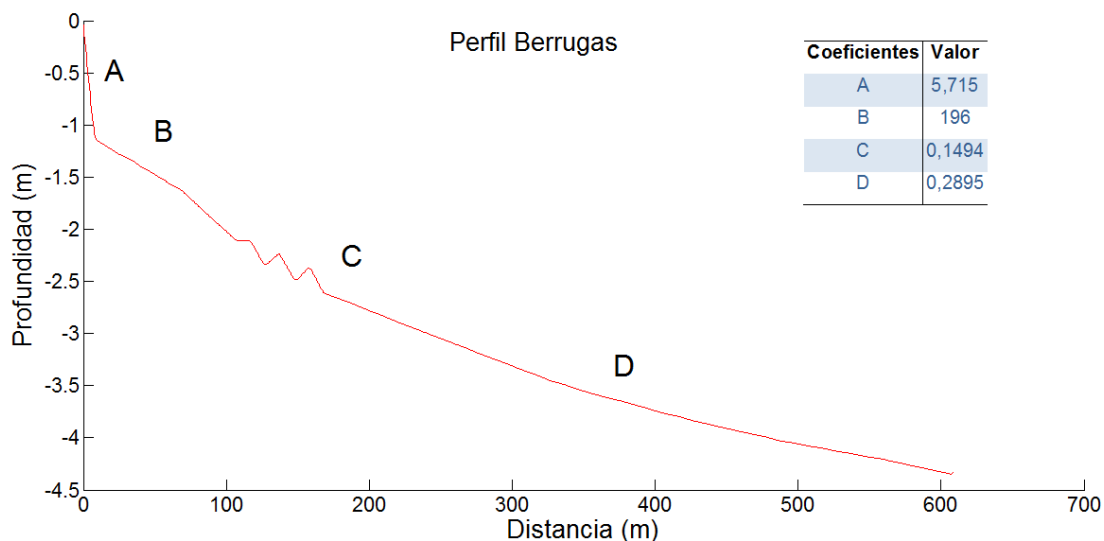


Figura 102: Coeficiente de Forma de Perfil playa Berrugas

En la Figura 102 se muestra los porcentajes de encontrar los valores de Iribarren I_r y I_{rb} para ratificar la clasificación realizada con los coeficientes hallados con el ajuste realizado por el perfil de Bernabéu

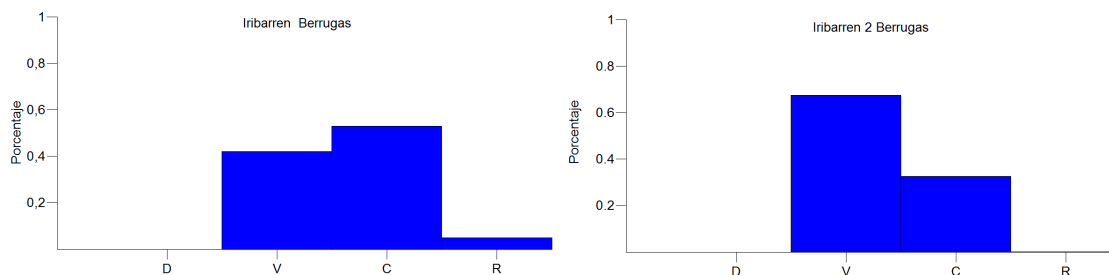


Figura 103: Porcentaje de I_r y I_{rb} para playa Berrugas

Reafirmando la clasificación realizada se utiliza el número de Iribarren, con lo que se puede observar en la Figura 102 que el oleaje es tipo voluta y colapso, en donde si es rotura en voluta se disipa energía en los primeros momentos de la rotura y si es colapso la reflexión comienza a disminuir debido a la pérdida de energía por turbulencia. (G.I.O.C 2002). Teniendo en cuenta el resultado de la tabla 19 en donde Ω para esta playa es igual a 1,94 que de acuerdo con Wright y Short corresponde a una playa intermedia reflejante del tipo Barra Canaleta, la cual se caracteriza por tener fuerte circulación rítmica que desaparece a medida que se acerca a la playa, pueden presentarse

pequeñas corrientes de retorno y unos cusps pronunciados. . Teniendo en cuenta esta información cabe resaltar que los resultados anteriores concuerdan con la información descrita para este tipo de playa

6.9. TOLÚ

Los valores de los coeficientes de forma para esta playa se muestran en la Figura 103, en donde podemos ver que A es pequeño lo cual nos dará una pendiente al inicio del perfil de rotura tendida, B es muy pequeño lo cual nos indica una pendiente al final del perfil de rotura es pronunciada, mientras que C y D son pequeños los cuales muestran que el perfil de asomeramiento es primero tendido y después algo pronunciado, mostrando una playa en estado intermedio. Teniendo en cuenta el tipo de sedimento y la pendiente de la playa la descripción de los coeficientes concuerdan con la descripción morfológica descrita por esos parámetros.

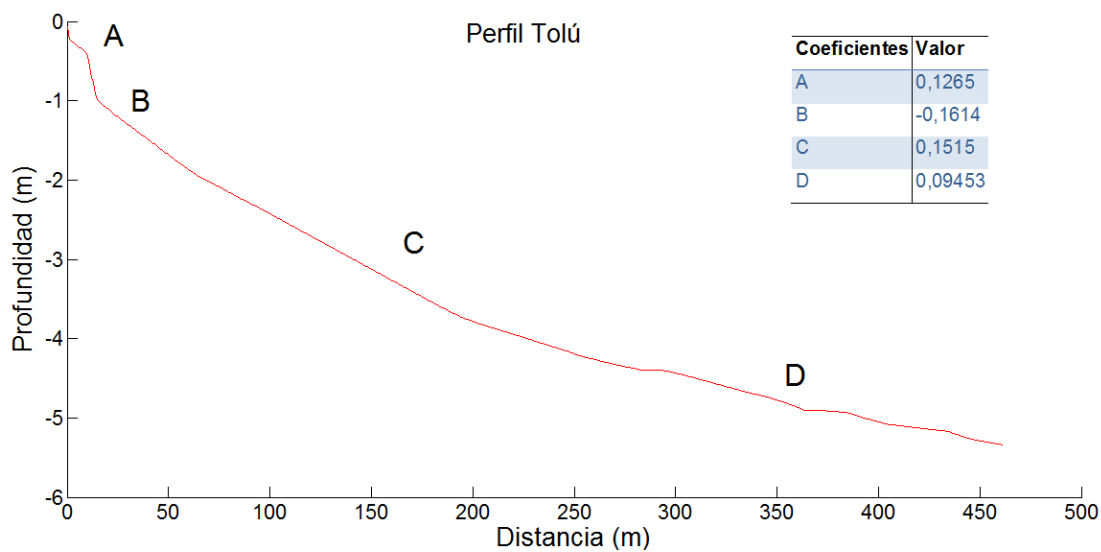


Figura 104: Coeficientes de forma de perfil Tolú

En la Figura 104 se muestra los valores de Iribarren I_r y I_{rb} para playa Tolú

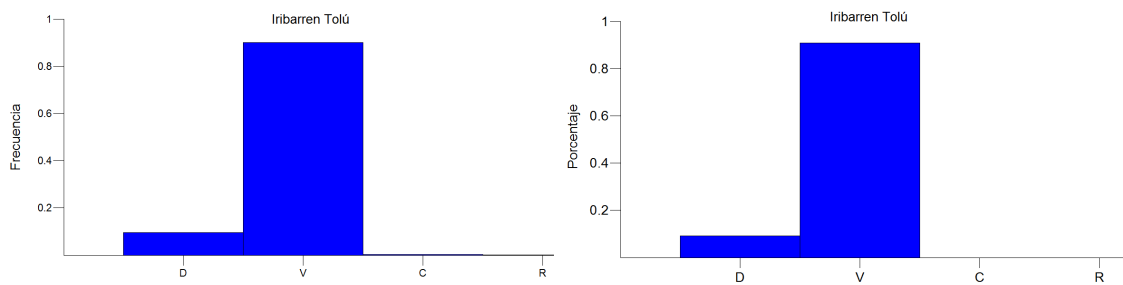


Figura 105: Porcentaje de I_r y I_{rb} para playa Tolú

Reafirmando la clasificación realizada se utiliza el número de Iribarren al pie de playa, con lo que se puede observar en la Figura 104 que el oleaje es tipo Voluta con posibilidades de encontrar oleaje tipo descrestamiento, característico de playas Intermedias disipativas, en donde en el momento de la rotura drástica hay una considerable cantidad de energía disipada. Teniendo en cuenta el resultado de la tabla 19 en donde Ω para esta playa es igual a 2,96 que de acuerdo con Wright y Short corresponde a una playa intermedia reflejante del tipo Barra transversal y corriente de retorno, la cual se caracteriza por tener fuerte circulación cíclica y presentan corrientes de retorno de una gran magnitud. Teniendo en cuenta esta información cabe resaltar que los resultados anteriores concuerdan de manera parcial con la información descrita para este tipo de playa ya que el parámetro Ω no concuerda con la clasificación de los coeficientes y el número de Iribarren.

6.10. COVEÑAS

Los valores de los coeficientes de forma para esta playa se muestran en la Figura 105, en donde podemos ver que A es grande lo cual nos indica una pendiente al inicio del perfil de rotura pronunciada, B es muy grande lo cual nos indica una pendiente al final del perfil de rotura es tendida, mientras que C y D son grandes los cual muestran que el perfil de asomeramiento es primero un poco pronunciada y después sigue tendido, mostrando una playa en estado reflejante. Teniendo en cuenta el tipo de sedimento y la pendiente de la playa la descripción de los coeficientes concuerdan con la descripción morfológica descrita por esos parámetros.

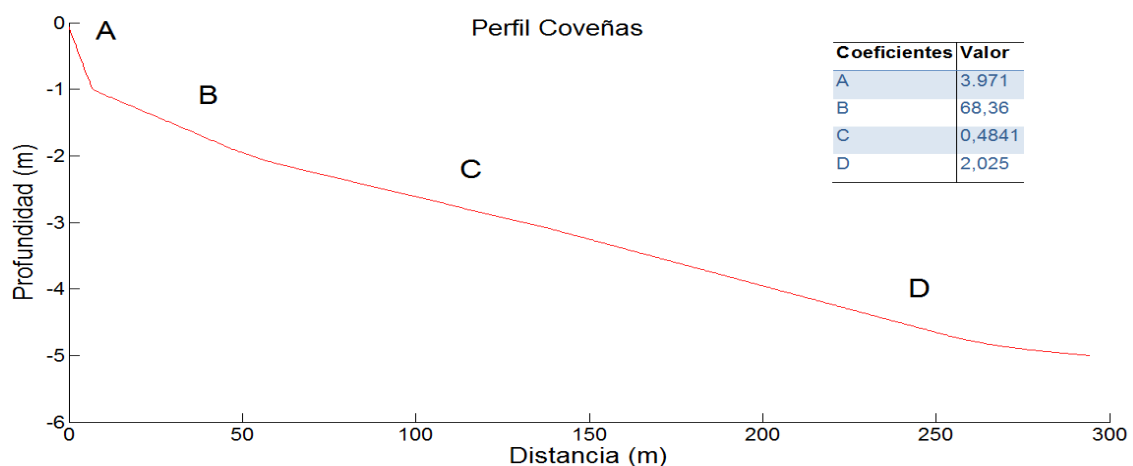


Figura 106: Coeficientes de la forma del perfil Coveñas

En la Figura 105 se muestra los valores de Iribarren I_r y I_{rb} para ratificar la clasificación realizada con el ajuste realizado en el perfil de Bernabéu.

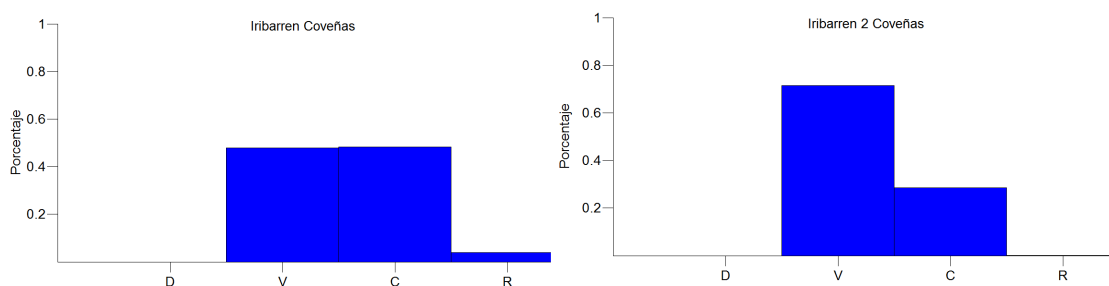


Figura 107: Porcentaje de I_r y I_{rb} para playa Coveñas

Los resultados de los cálculos del número de Iribarren y el número de Iribarren en rotura mostrados en la Figura 106, nos da como resultado que la mayor parte del tiempo la rotura es de tipo voluta, aunque pueden encontrarse una rotura tipo colapso y con poca frecuencia reflejante, característico de playas intermedias reflejantes. Teniendo en cuenta el resultado de la tabla 19 en donde Ω para esta playa es igual a 1,51 que de acuerdo con Wright y Short corresponde a una playa reflejante la cual se caracteriza por tener acentuados ascensos y descensos y los sistemas circulatorios presentan cusps y crestas de berma. Es importante resaltar que los coeficientes ajustados por las expresiones de Bernabéu, el número de Iribarren y Ω coinciden con la descripción y clasificación del tipo de playa.

6.11. TINAJONES

Los valores de los coeficientes de forma para esta playa se muestran en la Figura 107, en donde podemos ver que A es grande lo cual nos dará una pendiente al inicio del perfil de rotura pronunciada, B grande lo cual nos indica una pendiente al final del perfil de rotura es tendida, mientras que C y D son pequeños los cuales muestran que el perfil de asomeramiento es primero tendido y después algo pronunciado, mostrando una playa en estado intermedio. Teniendo en cuenta el tipo de sedimento y la pendiente de la playa la descripción de los coeficientes concuerdan con la descripción morfológica descrita por esos parámetros:

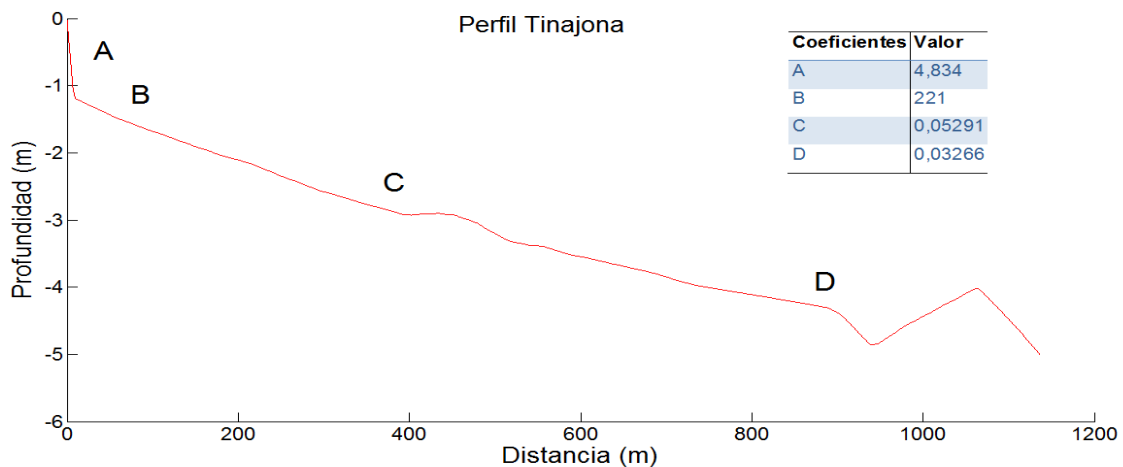


Figura 108: Coeficiente forma del perfil Tinajona.

La Figura 108 se muestra la clasificación de la playa según los valores de I_r y I_{rb} :

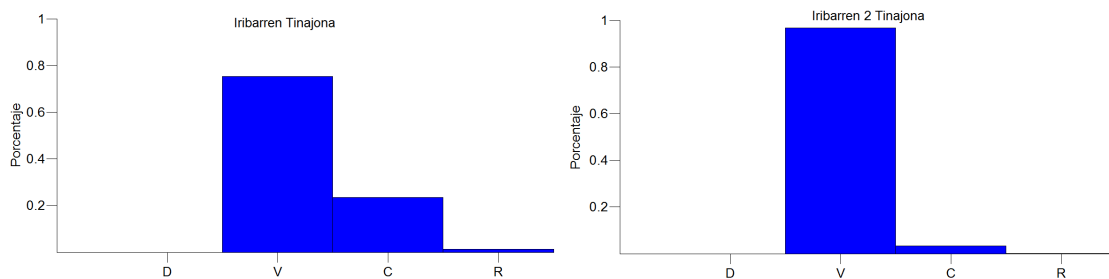


Figura 109: Porcentaje I_r y I_{rb} para playa Tinajones

Para la clasificación realizada se utiliza el número de Iribarren al pie de playa, con lo que se puede observar en la Figura 108 que en el pie de playa el rotura es tipo voluta y con probabilidades de encontrar rotura tipo colapso, característico de playas Intermedias disipativas, en donde en el momento de la rotura drástica hay una considerable cantidad de energía disipada. Teniendo en cuenta el resultado de la tabla 19 en donde Ω para esta playa es igual a 3,74 que de acuerdo con Wright y Short corresponde a una playa intermedia disipativa del tipo Barra y playa rítmica, la cual se caracteriza por un sistemas circulatorios en donde se presentan corrientes transversales y unas corrientes longitudinales débiles que encuentran su retorno sobre el rip, donde el flujo neto transversal es claramente hacia el mar. Es importante resaltar que los coeficientes ajustados por las expresiones de Bernabéu, el número de Iribarren y Ω coinciden con la descripción y clasificación del tipo de playa.

CAPITULO 7.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El perfil de Dean permite relacionar la velocidad de caída de sedimento y el diámetro de grano con la forma del perfil. El perfil de Inman por su parte responde a formas observables del perfil y podemos obtener el límite de cada una de las concavidades que responden a diferentes procesos de disipación de energía, pero con estos modelos no podemos lograr una caracterización morfodinámica completa, como podemos lograrlo con el perfil de Bernabeu, que permite clasificar las playas según su forma, pendiente y sedimentos además establecer una relación de la morfología con la hidrodinámica.

Las playas del Caribe Colombiano con altura del ola en aguas someras entre 0,5m y 2,5m, en donde el oleaje es bastante energético ya que su dirección de propagación es perpendicular a la línea de Costa generando estados disipativos e intermedios disipativos, , En cambio las playas con alturas de ola en aguas someras entre 0,4m y 1,3m, en donde el oleaje proviene del Nornoroeste y del Oeste tienen un oleaje menos energético ya que los procesos de refracción y difracción son mayores, los estados morfodinamicos encontrados en estas playas son intermedios reflejantes,.

En las playas que presentan sistemas circulatorios con pequeños rips y beach cups, puede generar playas con pendiente primero tendidas y luego pronunciadas con una rotura de oleaje tipo voluta y descrestamiento, mientras que rips fuertes y Cups pueden originar playas con pendientes en el tramo de rotura, primero pronunciadas y luego tendida con una rotura del oleaje tipo voluta y colapso.

En las playas con pendientes en los perfiles primero tendida y luego pronunciada se presentan sedimentos tipo arena fina a media, mientras que en perfiles con pendientes primero pronunciada y después tendida se presentan sedimentos tipo arena de media a gruesa.

Según el número de Iribarren, en las playas del Caribe Colombiano se presentan rotura tipo voluta y descrestamiento, debido a la baja pendiente y al que punto de rotura está más alejado de la línea de costa, En cambio en playas con pendientes grandes y puntos de rotura más cerca de la línea de costa se presentan una rotura del oleaje tipo colapso.

En las playas del Caribe Colombiano estudiadas tienen más predominancia sistemas de corriente con beach cups, corrientes transversales y longitudinales y rips lo que puede originar estados morfológicos intermedios con más tendencias a los intermedios disipativos con una rotura del oleaje tipo voluta. son escasos los estados morfodinámicos intermedios reflectivos y reflejantes, este tipo de playas se encuentran ubicadas en la zona del Golfo de Morrosquillo, donde las alturas de ola predominantes están entre 0.8m y 1.2 metros, teniendo un oleaje con menor energía y en donde los procesos de refracción de difracción del oleaje son mayores.

CAPITULO 8

CONCLUSIONES

Las playas del Caribe Colombiano presentan alturas significantes entre 0,3m y 3,5m aproximadamente, con periodos de pico entre 2s y 18s, con dirección predominante del cuadrante NE en aguas profundas.

En cuanto a los resultados obtenidos a partir de las modelaciones realizadas con el modelo numérico SWAN, se encontró que en el punto donde se encuentra el pie de playa de las playas del Caribe Colombiano se presentan alturas entre 0,5m y 2,5m o 0,4m y 1,2m dependiendo de la zona en la que se ubique la playa con unas direcciones para los frentes de ola predominante al NO y al NNO, paralelos a la línea de costa, debido a la predominancia de los procesos de refracción y difracción del oleaje.

La ecuación de Dean es una expresión matemática sencilla que está relacionada con el tamaño de grano y la velocidad de sedimento. Según Dean se puede decir que las playas del Caribe Colombiano presentan un sedimento que va de arena gruesa a arena fina y velocidades de caída de grano con valores aproximados de 0,001m/s a 0,02m/s.

El perfil de Inman no ofrece una buena representación de la morfología de las playas del Caribe Colombiano, debido a que ésta es una formulación para playas con barras arenosas, en la que se pueden obtener, mediante algunas variaciones en la ecuación básica, el punto de inflexión el cual además de darme la ubicación de la barra y formas observables del perfil me brinda el límite en los cuales los perfiles responden a diferentes procesos de energía.

Manzanillo- Bolívar es la única de las playas de estudio que puede representarse por medio del perfil de Inman por tener una barra arenosa a 219,2m de la línea de costa y a una profundidad de 2,3m, en donde se puede dar la rotura de la ola.

Las playas del Caribe Colombiano se pueden describir por medio del perfil de Bernabéu, porque permite tratar de forma separada las partes del perfil de playa y su ajuste permite aproximar la morfología del perfil, la cual fue descrita por los parámetros A, B, C y D con el tipo de sedimento encontrado en la literatura consultada y la pendiente de la playa.

Los coeficientes asociados a cada tramo del perfil de playa cumplen con la misma relación entre los coeficientes A y B y C y D propuesta por Bernabéu (2003), en la zona de estudio A y C son proporcionales y B y D son inversamente proporcionales, además cumple que en cuanto sea mayor la pendiente del tramo de rotura mayores valores toma los coeficiente de forma y entre menor sea la pendiente en el asomeramiento mayor serán los coeficientes respectivos.

Las playas estudiadas presentan sistemas circulatorios con pequeños rips y beach cups, puede generar playas con pendiente en el tramo de rotura, primero tendido y luego pronunciado con una rotura de oleaje tipo voluta y descrestamiento

El estado morfodinámico predominante en el Caribe Colombiano fue intermedio disipativa de tipo barra longitudinal y seno con sistemas circulatorios que pueden presentar beach – cusps en el frente de playa y rips débiles de acuerdo con la clasificación realizada por Wright y Short (1984), con una rotura del oleaje tipo voluta según el número de Iribarren..

Las playas de la Guajira presentan características morfológicas intermedias disipativas con sedimentos tipo Arena media y un oleaje con una rotura tipo Voluta.

Las playas de Costa Verde y Puerto Velero presentan características morfológicas tipo Intermedio disipativas, con sedimentos tipo arena fina y oleaje tipo Voluta y Descrestamiento respectivamente. Por su parte, Las playas situadas en Cartagena presentan características morfológicas pertenecientes a estados disipativos con sedimentos tipo arena fina a media y un oleaje con una rotura tipo Descrestamiento. Finalmente, Las playas situadas en el golfo de Morrosquillo presentan características morfológicas pertenecientes al estado intermedio - reflejante, con sedimentos del tipo arena media y un oleaje con una rotura tipo Voluta.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Gómez and García, (2012), Caracterización morfodinámica a corto plazo de playa Palmera, parque nacional natural Gorgona, Colombia, XXV Congreso Latinoamericano de hidráulica San José, Costa Rica.
- A. Meneses, (2009), Efecto del nivel freático en playas, Universidad Nacional Autónoma de México...,
- A. Merlotto, (2013), Clasificación morfodinámica estacional de playas del partido de Nercochea, provincia de Buenos Aires, Argentina, Ciencias Marinas.
- A. Sánchez and J. Jiménez, (1994), Ingeniería de Playas, Concepto de Morfología Costera, Ingeniería de aguas, Volumen I.
- A. Sánchez and J. Jimenez. (1995). Evolución de playa, Perfil de playa, Métodos predictivos. Ingeniería de aguas Vol 2.
- Aagaard T, Greenwood B, Hughes M. (2013). Sediment transport on dissipative, intermediate and reflective beaches. Elsevier B.V.
- Barman N. (2016). Beach Morphodynamics in Subarnarekha Delta Plain. SpringerBriefs in Geography.
- C. Garau, (1989), Perfil de la playa y tamaño de la arena, Revista de obras públicas.
- C. Ricaurte-Villota, M. Bastidas Salamanca, (2017). Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés (INVEMAR). Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 14. Santa Marta, Colombia 180 p.
- C. Tovia, (2016), Análisis de la evolución morfológica de una playa micromareal utilizando métodos estadísticos multivariados de clasificación, Universidad del Norte.
- C. Vidal, M. Losada, R. Medina, I. Losada. (1995), Modelos de Morfodinámica de playas, Ingenierías de aguas volumen 2.
- CIOH 18, (1997), Calculo del oleaje y el transporte de sedimento en la Costa Caribe Colombiana.
- D. Inman, (1993), Shorerise and Bar – Berm profile on ocean beaches, Journal of Geophysical Research, Vol 98.
- D. Stagonas, D. Warbrick, G. Muller, D. Magagna. (2012). Surface

tension effects on energy dissipation by small scale, experimental breaking waves. Elsevier.

- Dimar-CIOH. (2009). Caracterización físico – biótica del Litoral Caribe Colombiano Tomo I. Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Ed. Dimar, Serie Publicaciones Especiales CIOH Vol. 8. Cartagena de Indias, Colombia. 225 pp.
- Dimar-CIOH. (2009). Caracterización físico – biótica del Litoral Caribe Colombiano Tomo I. Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Ed. Dimar, Serie Publicaciones Especiales CIOH Vol. 8. Cartagena de Indias, Colombia. 225 pp.
- Dimar-CIOH. (2013). Atlas Geomorfológico del Litoral Caribe Colombiano. Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Ed. Dimar, Serie Publicaciones Especiales CIOH Vol. 1. Cartagena de Indias, Colombia. 225 pp.
- G. Vernet and P. Lesueur, (1986), Descripción y representación de las características sedimentológica de la bahía de Cartagena, Geología Colombiana No 15.
- Grupo GIOC, (2002), Documento de referencia, Procesos litorales Volumen II, Universidad de Cantabria.
- Grupo GIOC, (2002), Documento Temático, Regeneración de playas, Universidad de Cantabria.
- H. Power, T. Baldock, D. Callaghan, P. Nielsen (2013). Surf zone states and energy dissipation regimes- a similarity model. Coastal Engineering Journal, Vol. 55, No. 1.
- Hidrodinámica Costera, 2004, www.tdx.cat/bitstream/10803/6389/6/06Ocma06de13.pdf
- I. López, (2014), Clasificación Morfológica d las playas y modelado del perfil transversal en Valencia, Alicante y Murcia, Universidad de Alicante.

- J. Merchan, (2005), Hidrodinámica en la zona de rompientes de playas micromareales: contribución del régimen gravitatorio e infragravitatorio, Universidad del Norte.
- M. Bernabeu, R. Medina, C. Vidal. (2002). Efecto de la reflexión sobre la forma del perfil de playa: Validación para la costa de la península Ibérica. Rev. C&G, 16 (1-4)
- M. Bernabeu, R. Medina, C. Vidal. (2003). A morphological model of the beach profile integrating wave and tidal influences. Elsevier Science B.V
- M. Bernabeu, R. Medina, C. Vidal, J.J Muñoz-Perez. (2001). Estudio morfológico del perfil de playa: Modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. Rev. Soc. Geol. de España, 14 (3-4)
- M. Conde, (2014), Análisis numérico y experimental de ondas infragravitatorias en playas micromareales, Universidad del Norte.
- M. Guisado and G. Malvárez. (2015). Estado morfodinámico de las playas a través de la modelización numérica de propagación y asomeramiento del oleaje: El frente Litoral Doñana. GeoFocus, no 15, p 163-180. ISSN:1578-5157
- M. L. Stutz, A.W. Sam Smith and O. H. Pilkey. (1998). Differing Mechanisms of Wave Energy Dissipation in the Wave Shoaling Zone, Surf Zone, and Swash Zone. Journal of Coastal Research.
- M. Larson, N. Kraus, R. Wise. (1998), Equilibrium beach profile under breaking and non-breaking waves, Elsevier.
- M. Zetina, (2008), Análisis del modelo del perfil de playa en equilibrio aplicada a una playa de Yucatán – México, Ingeniería 12 – 3.
- Manual de referencia PETRA 2.0 , Universidad de Cantabria, GIOC. www.smc.ihcantabria.es/SMC25/wp-content/uploads/.../Manual-de-referencia-de-Petra.pdf
- Masselink and Short. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamic and morphology: A conceptual beach model. Journal of Coastal Research.

- N. Rangel and G. Anfuso, (2013), Morfología, morfodinámica y evolución reciente en la península de la Guajira, Caribe Colombiano, Universidad de Cartagena.
- R. Medina, C. Vidal, M. González. (2001). Modelación morfodinámica de playas por medio de las formulaciones de equilibrio. Física de la tierra.
- R. Medina, I. Losada, M. Losada, C. Vidal. (1995). Variabilidad de los perfiles de playa: Forma y distribución granulométrica. Ingeniería del Agua. Vol. 2 Num. Extraordinario
- S. Martínez, (2013), Estudio morfodinámico de una playa lineal. Aplicación al caso de Gandía, Universidad Politécnica de Valencia
- Stelling and M. Zijlema. (2009). Numerical modeling of wave propagation, breaking and run-up on a beach, Swash Source forge
- SWAN user Manual Versión 41.10, Delft University of Technology 1996 – 2016.
- T. Scott, G. Masselink, P. Russell. (2011). Morphodynamic characteristics and classification of the beach in England and Wales. Elsevier B.V.
- W. Rattanapitikon. (2007). Calibration and modification of energy dissipation models for irregular wave breaking. Elsevier.
- Wright and Short, a. D. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine geology*.
- Y.H. Zheng a, Y.M. Shen b , X.G. Wu b , Y.G. You (2003). Determination of wave energy dissipation factor and numerical simulation of wave height in the surf zone. Elsevier